



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ**

INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

**KORELACE VÝSLEDKŮ STANDARDNÍCH  
MECHANICKÝCH ZKOUŠEK S VÝSLEDKY  
PROTLAČOVACÍCH ZKOUŠEK NA MINIATURNÍCH  
DISCÍCH**

CORRELATION OF STANDARD MECHANICAL TEST RESULTS AND SMALL PUNCH TEST RESULTS

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Jakub Holzer**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Libor Válka, CSc.**

**BRNO 2016**

## Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav materiálových věd a inženýrství  
Student: **Jakub Holzer**  
Studijní program: Aplikované vědy v inženýrství  
Studijní obor: Materiálové inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Libor Válka, CSc.**  
Akademický rok: 2015/16

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### **Korelace výsledků standardních mechanických zkoušek s výsledky protlačovacích zkoušek na miniaturních discích**

#### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Protlačovací zkoušky na miniaturních discích (small punch test, SPT) jsou relativně novou a perspektivní metodou pro stanovování materiálových charakteristik a lomově-mechanických vlastností materiálů. V současné době je velmi intenzivně studována problematika korelace výsledků standardních mechanických zkoušek s výsledky protlačovacích zkoušek. Pozornost je věnována zejména možnostem odhadu materiálových charakteristik z výsledků SPT a vlivu externích faktorů na tyto odhady.

#### **Cíle bakalářské práce:**

- na základě studia literárních pramenů vypracovat rešerši o vztahu materiálových charakteristik získaných standardními postupy mechanického zkoušení zejména kovových materiálů s materiálovými charakteristikami, určenými prostřednictvím protlačovacích zkoušek na miniaturních discích
- kriticky posoudit možnosti odhadu materiálových charakteristik z výsledků protlačovacích zkoušek
- provést rozbor vlivu externích faktorů na výše uvedené odhady
- popsat výhody a nevýhody metody SPT, definovat okruhy problémů limitující možné korelace výsledků SPT a standardních zkoušek

#### **Seznam literatury:**

CWA 15627 (2007): Small Punch Test Method for Metallic Materials. Part A: A Code of Practice for Small Punch Creep Testing and Part B: A Code of Practice for Small Punch Testing for Tensile and Fracture Behaviour, Documents of CEN WS21, Bruxelles.

Lucas, G. E. (1983): The development of small specimen mechanical test techniques. Journal of Nuclear Materials, Vol. 117, July 1983, pp. 327-339, DOI: 10.1016/0022-3115(83)90041-7.

Matocha, K. (2010): Hodnocení mechanických vlastností konstrukčních ocelí pomocí penetračních testů. 1. vyd. Ostrava, VŠB-TU, 73 s., ISBN 978-80-248-2223-5.

García, T. E., Rodríguez, C., Belzunce, F. J., Suárez, C.: Estimation of the mechanical properties of metallic materials by means of the small punch test. Journal of Alloys and Compounds, Vol. 582 (2014), pp. 708-717, ISSN 0925-8388.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16.

V Brně, dne 28. 11. 2015



prof. Ing. Ivo Dlouhý, CSc.  
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan

## **ABSTRAKT**

Obsahem bakalářské práce je analýza vztahů mezi materiálovými charakteristikami primárně kovových materiálů, získanými standardními postupy mechanického zkoušení a materiálovými charakteristikami, určenými prostřednictvím protlačovacích zkoušek na miniaturních discích.

V práci jsou rozebírány metody a postupy používané pro odhad materiálových charakteristik z výsledků protlačovacích zkoušek, analyzován je vliv externích faktorů na uvedené odhady. Uvedeny jsou hlavní problémy limitující korelace výsledků standardních mechanických zkoušek a zkoušek protlačovacích.

Součástí práce je experimentální ověření platnosti vybraných korelačních vztahů.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Protlačovací zkouška na miniaturních discích, mechanické vlastnosti, korelace,

## **ABSTRACT**

The Bachelor's thesis is aimed to sum up relations of mechanical properties of metallic materials obtained by standard mechanical tests with material properties obtained by small punch test.

Methods and procedures used to evaluate material properties are evaluated and influence of external circumstances is analysed. Most important difficulties, that limit correlation of standard mechanical tests results and small punch test results, are also stated. Thesis contains an experimental validation of few selected correlation formulas.

## **KEY WORDS**

Small punch test, mechanical properties, correlation

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

HOLZER, J. *Korelace výsledků standardních mechanických zkoušek s výsledky protlačovacích zkoušek na miniaturních discích*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 52 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Libor Válka, CSc..

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem předloženou bakalářskou práci vypracoval samostatně dle pokynů vedoucího bakalářské práce a použil jen prameny uvedené v seznamu literatury.

V Brně dne

Jakub Holzer

## **PODĚKOVÁNÍ**

Touto cestou bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Liborovi Válkovi, CSc. za ochotu, čas, příkladné vedení a podnětné rady během konzultací. Dále bych rád poděkoval celé mé rodině za podporu během studia.

# Obsah

1. Úvod.....	3
2. Historie a vývoj zkoušky .....	3
3. Cíle práce .....	4
4. Příprava zkušebních těles.....	5
4.1 Metody odebrání materiálu .....	5
4.1.1 Princip mechanického odbrušování.....	5
4.1.2 Princip elektrojiskrového odběru .....	7
4.2 Finální příprava zkušebního tělesa.....	7
5. Princip zkoušky.....	7
5.1 Experimentální uspořádání a rozdělení metod SPT .....	8
5.1.1 Řízená veličina, časová závislost .....	8
5.1.2 Upnutí zkušebních těles.....	9
5.1.3 Teplota zkoušky.....	10
5.1.4 Geometrie razníku .....	10
5.1.5 Geometrie zkušebního tělesa .....	12
6. Popis závislosti síla $F$ – průhyb $u$ .....	14
7. Stanovení materiálových charakteristik ze záznamu protlačovací zkoušky .....	17
7.1 Stanovení napětíových vlastností .....	17
7.1.1 Stanovení síly $F_m$ .....	17
7.1.2 Stanovení síly $F_y$ .....	17
7.1.3 Stanovení síly $F_f$ .....	19
7.2 Stanovení deformačních charakteristik .....	20
7.2.1 Stanovení průhybu $u_m$ při maximální síle $F_m$ .....	20
7.2.2 Stanovení průhybu $u_y$ při síle $F_y$ .....	20
7.2.3 Stanovení průhybu $u_f$ při lomové síle $F_f$ .....	20
7.3 Stanovení křehkolomových charakteristik .....	20
7.3.1 Stanovení absorbované energie $W_f$ a $W_m$ .....	21
7.3.2 Stanovení efektivní lomové deformace .....	21
8. Přepočet materiálových charakteristik.....	22
8.1 Přepočet napětíových charakteristik .....	22
8.1.1 Přepočet síly $F_m$ na mez pevnosti .....	22
8.1.2 Přepočet síly $F_y$ na mez kluzu .....	24



8.2 Přepočet deformačních charakteristik .....	27
8.2.1 Přepočet posunutí $u_m$ na tažnost $A$ .....	27
8.2.2 Přepočet sil $F_y$ a $F_m$ na skutečnou deformaci $\varepsilon$ .....	27
8.2.3 Přepočet posunutí $u_f$ a $u_y$ na kontrakci $Z$ .....	28
8.3 Přepočet křehkolomových charakteristik .....	29
8.3.1 Hodnocení tranzitního lomového chování .....	29
8.3.2 Přepočet hodnot zjištěných pomocí penetračního testu na lomovou houževnatost .....	33
9. Vliv externích faktorů na penetrační testy .....	36
10. Závěr.....	40
Seznam použitých zdrojů .....	42
Seznam použitých zkratk.....	47
Seznam obrázků .....	48
Seznam tabulek .....	50
Seznam použitých symbolů.....	51
Příloha 1 .....	I
Příloha 2 .....	II
Příloha 3 .....	III

## 1. Úvod

Protlačovací zkoušky na miniaturních discích (Small Punch Test, dále jen SPT) jsou relativně novou metodou zjišťování mechanických charakteristik jak materiálu v jeho výchozím stavu, tak ve stavu po provozním zatížení, kdy může v důsledku celé řady vlivů (teplota, radiace, korozní prostředí apod.) dojít ke změně jeho materiálových vlastností. Kvantitativní stanovení úrovně těchto změn vyžaduje v případě použití standardních metod měření materiálových charakteristik (např. zkoušky tahem, zkoušky rázem v ohybu, zkoušky lomové houževnatosti apod.) odběr poměrně velkého množství experimentálního materiálu, což může být např. při posuzování zbytkové životnosti provozovaných komponent značně problematické. [1]

Metoda SPT představuje perspektivní způsob získání experimentálního materiálu pro účely posouzení jeho vlastností a tím zpřesnění odhadu zbytkové životnosti za podmínek minimálních zásahů do vlastní konstrukce a ovlivnění její provozuschopnosti. Pokud je součástí uzpůsobena k odběru experimentálního materiálu, nemusí v některých případech vůbec dojít k přerušení provozu. [2]

Metody studia mechanických charakteristik pomocí metodiky SPT, korelace výsledků získaných pomocí této metody s výsledky standardních mechanických zkoušek a vývoj nových modelů lomového chování materiálů, založených na metodě SPT je v současné době předmětem zájmu mnoha výzkumných pracovišť po celém světě.

## 2. Historie a vývoj zkoušky

Na přelomu 70. a 80. let 20. století se inženýrská komunita zaměřila na vývoj nových technologií a metod pro získávání mechanických vlastností prostřednictvím protlačovacích zkoušek miniaturních disků. V prvopočátcích byla tato zkouška využívána ke zjišťování změn mechanických vlastností v důsledku zvýšených teplot a radiačního zkrěhnutí u ocelí používaných v energetickém průmyslu. Díky souběžnému zdokonalování počítačových systémů a pokroku v používání a modelování metodou konečných prvků byla v roce 1981 navržena pomocí metody konečných prvků první křivka představující závislost zatížení-posuv pro diskové vzorky o velikosti  $3 \text{ mm} \times 0,25 \text{ mm}$  [3]. Později bylo provedeno mnoho studií, které prokazovaly dobré výsledky metody ve srovnání s klasickými zkouškami. Vědecká komunita si uvědomila, že použitím této zkoušky se dá testovat stav materiálu bez nutnosti destrukce součásti, materiálu neznámých vlastností nebo s neznámým tepelným zpracováním. [4]. V dalších letech byly vyvíjeny nové způsoby vyhodnocování výsledků, popisu napjatosti ve zkušebním tělese a v neposlední řadě způsoby zjišťování různých materiálových vlastností [5]. V dnešní době je výzkum orientován zejména na použití metody SPT při hodnocení lomově-deformační odezvy materiálů na zatěžování při vysokých teplotách (creep), resp. při teplotách nízkých (kryogenních). Stále více se rozšiřuje i analytický přístup využívající metody konečných prvků.

Vzhledem k faktu, že výsledky SPT nelze přímo převádět na hodnoty standardních mechanických charakteristik, je nutné mít pro vyhodnocení zkoušek k dispozici řadu parametrů a údajů, vztahujících se k vlastnímu provedení testů. Jako první se

o sjednocení podmínek při měření pomocí SPT pokusili vědci z JAERI (Japan Atomic Energy Research Institute) v roce 1988 v práci Recommended practice for small punch (SP) testing of metallic materials (draft) [6]. V uvedené práci je doporučeno použití čtvercových těles s rozměry  $10 \times 10$  mm a tloušťkou 0,5 a 0,25 mm, resp. kruhových těles o průměru 3 mm a tloušťce 0,25 mm. Jsou zde uvedena i doporučení, týkající se tvrdosti penetrátoru. V 90. letech se zkouška rozšířila i do Evropy, v prvopočátku byla intenzívně vyvíjena na Swansea University v Anglii a v CESI (Centro Elettrotecnico Sperimentale Italiano Giacinto Motta), Itálie [7].

V roce 2007 byla zveřejněna dohoda CWA 15627 Evropské komise pro standardizaci (CEN, Comité Européen de Normalisation), obsahující doporučení pro zkoušení metodou SPT. Doporučení se týkají geometrie zkušebních těles, podmínek zkoušení (včetně požadavků na experimentální zařízení) a metodiky vyhodnocování experimentálních dat. [8] Metoda SPT není do současné doby normalizována.

### **3. Cíle práce**

Cílem práce je vypracování rešerše zabývající se vztahem materiálových charakteristik získaných standardními postupy mechanického zkoušení, zejména kovových materiálů, s materiálovými charakteristikami určenými prostřednictvím protlačovacích zkoušek na miniaturních discích.

Kriticky posoudit možnost odhadu materiálových charakteristik z výsledku protlačovacích zkoušek, rozebrat vliv externích faktorů na popsání odhadů a reálně zhodnotit výhody a nevýhody této metody zkoušení. Práce se také bude zabývat problémy limitujícími korelaci výsledků standardních protlačovacích zkoušek a standardních mechanických zkoušek.

## 4. Příprava zkušebních těles

Protlačovací zkouška je považována za nedestruktivní metodu zkoušení materiálu, protože odběr materiálu je minimální a při jeho extrakci nedojde k významnému porušení nebo ovlivnění funkce součásti či stroje. Vzorek se dá odebírat z jakéhokoli vhodného místa vnější i vnitřní konstrukce zařízení. Velkou výhodou je, že z odebraného materiálu se často dá vytvořit několik zkušebních těles a je tedy možné dosáhnout statisticky významného souboru dat pro hodnocení měření. Problém však může nastat, pokud odebraný vzorek nebude dostatečně reprezentativní pro celý materiál, proto se místo odběru musí volit velmi pečlivě [9]. Zkušební těleso může být homogenní, ale může obsahovat i výrobní vady, různé oblasti svarových spojů, difuzních vrstev apod. Doporučuje se ke vzorkům přikládat informace o tepelném či chemicko-tepelném zpracování materiálu, způsobu jeho odběru a historii (doba používání zařízení, provozní teplota, velikost a způsob zatížení) [8]. Evropská komise pro standardizaci také doporučuje počet zkušebních těles pro různé typy zkoušek, viz tab. 1.

Tabulka 1 Počet zkušebních těles v závislosti na typu zkoušky [8]

Zatížení vzorku	Odvozované vlastnosti	Minimální počet vzorků
Tahové	Mez kluzu, mez pevnosti	2
Creepové	Mez pevnosti při tečení	5
Časově nezávislý lom	Tranzitní teplota	7
	$K_{IC}$ , $J_{IC}$	2

### 4.1 Metody odbírání materiálu

K odbírání materiálu ze součásti se používají dvě metody s různým fyzikálním principem oddělení vzorku od tělesa:

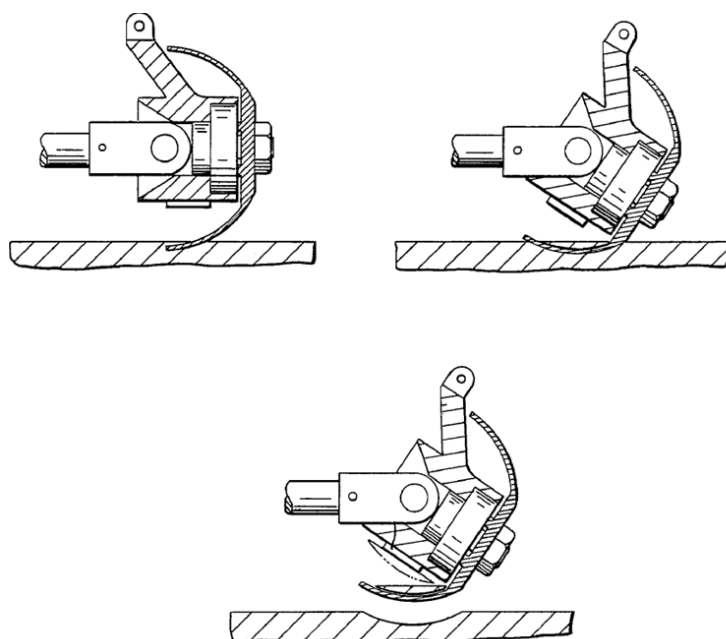
- mechanické odbrušování;
- elektrojiskrový odběr.

Odběr se provádí pomocí odběrových hlav přímo na místě a to i v těžko přístupných místech. Stroje určené pro odběr vzorků jsou přenosné a jejich limitací je nutnost relativní rovnosti povrchu testované součásti a velikost součásti. Přípravek musí být při činnosti uchycen k součásti. Vzorek odděleného materiálu má tvar kulového vrchlíku.

#### 4.1.1 Princip mechanického odbrušování

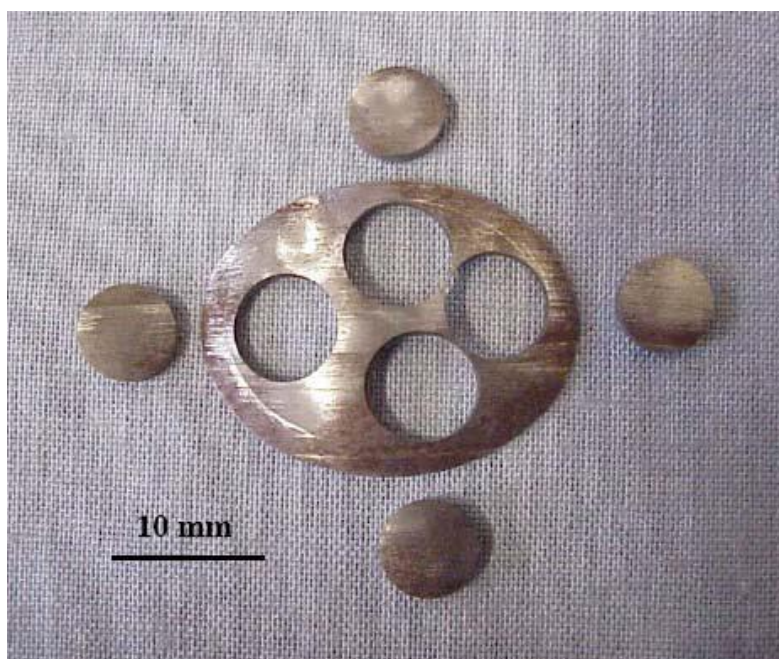
Oddělení vzorku je prováděno rotujícím řezným nástrojem ve tvaru polokoule, jejíž lem je pokryt velmi tvrdým abrazivem. Pomocí jiného, často pákového mechanismu je dosaženo pomalého zasouvání rotujícího nástroje do záběru. Celý proces je poměrně časově náročný a trvá 1 až 2 hodiny pro jeden vzorek. Po dokončení odběru získáme vzorek o průměru cca 25 mm a výšce 3 ÷ 4 mm. Při odbírání materiálu je nástroj chlazen vodou a velmi pomalý posuv zajišťuje, že do konstrukce, ze které je vzorek odbírán i do vzorku samotného není vneseno žádné deformační či tepelné pnutí. Po dokončení odběru je vzorek zachycen permanentním magnetem, aby nedošlo k jeho

poškození či destrukci rotujícím nástrojem, viz schéma na obr. 1. Stejným způsobem se také dá odebrat vzorek pro stanovení meze únavy v tahu-tlaku [10].



Obr. 1 Odběr zkušebního materiálu pomocí mechanického odbrušování. [11]

V obr. 1 je znázorněna pracovní hlava ve třech pozicích: po vniknutí do materiálu, nakloněná hlava v konečné fázi řezání vzorku, na spodním obrázku je patrné přichycení odebraného materiálu k magnetu. [11]



Obr. 2 Příklad odebraného vzorku pomocí mechanického odbroušení a následného vyříznutí čtyř zkušebních těles [12]

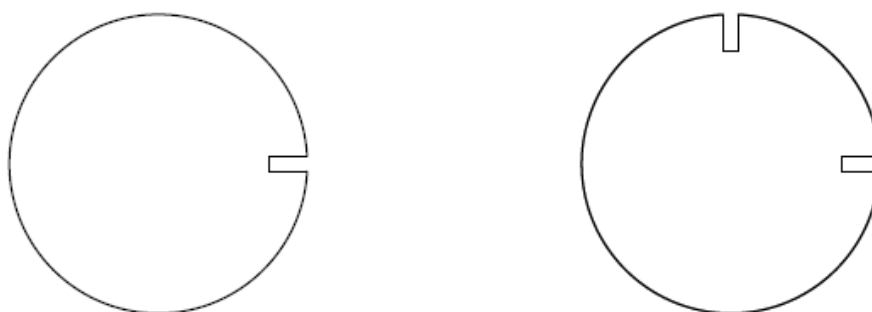
#### 4.1.2 Princip elektrojiskrového odběru

Podstatou elektrojiskrového odběru experimentálního materiálu je selektivní odtavení malých částic materiálu. Výhodou této technologie je minimální vznik prutů, nízká cena a snadná obsluha. [1]

#### 4.2 Finální příprava zkušebního tělesa

Podle CEN je doporučeno provádět zkoušku na discích o průměru 8 mm a tloušťce 0,5 mm. Odebraný materiál se zbrousí přibližně na 0,55 milimetru a poté z obou stran leští leštícím papírem o velikosti zrna cca 45  $\mu\text{m}$ , následně cca 15  $\mu\text{m}$  na požadovanou tloušťku 0,5 mm s tolerancí 1 %. Tolerance pro průměr vzorku je 1%. Pokud se jedná o vzorek po chemicko-tepelném zpracování, leštění se provádí jen z jedné strany, aby se předešlo ovlivnění vlastností. Je doporučeno měřit tloušťku na obvodu disku ve čtyřech pozicích po 90° a uprostřed disku, průměr disku by měl být měřen alespoň ve dvou navzájem kolmých pozicích. [8]

V případě větších sérií zkušebních těles je nutné tělesa označovat, aby nedošlo k jejich záměně. Vzhledem k tomu, že nesmí dojít k ovlivnění výsledků zkoušek použitím nevhodného způsobu označování např. ve středové části zkušebního tělesa, používá se v praxi metoda rytí (vybrušování) značek do okrajové části tělesa, jak je zobrazeno na obr. 3. Jejich hloubka nesmí být větší než jeden milimetr. [13]

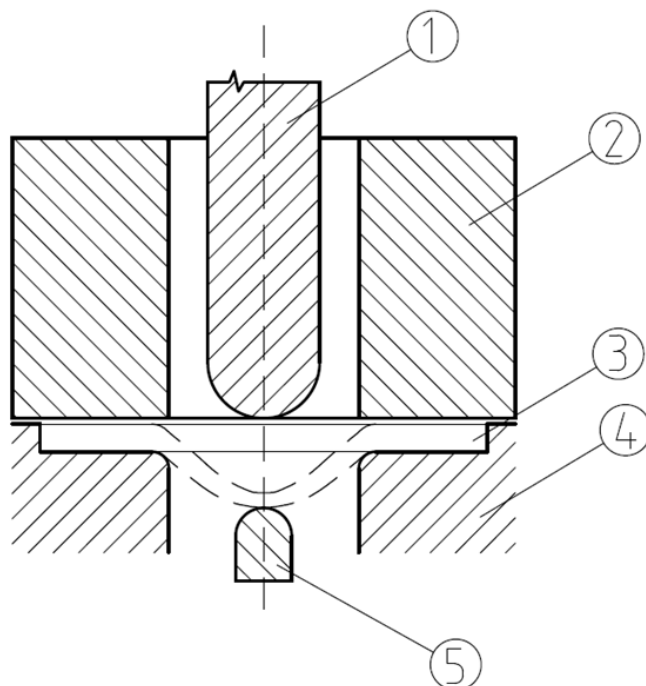


Obr. 3 Příklad označení zkušebního tělesa metodou vybrušování

### 5. Princip zkoušky

Princip zkoušky, jejíž schéma je ukázáno na obr. 4, je velmi podobný zkoušce hlubokotlačnosti dle Erichsen. Podstatou je průnik penetrátoru, což je razník ve tvaru kuličky nebo kovového válce s hemisférickým, rovným nebo kuželovitým zakončením do zkušebního tělesa až do jeho porušení. Výstupem zkoušky je závislost síly vyvolané penetrátorem na průhybu vzorku. Z výsledného záznamu jsou poté vyhodnoceny charakteristické veličiny, které slouží pro stanovení mechanických parametrů známých z konvenčních zkoušek, jako jsou např. mez pevnosti, mez kluzu, creepové charakteristiky, tranzitní teploty, lomová houževnatost a jiné.

Zkoušky je možné provádět za zvýšených nebo snížených teplot, pokud je zařízení vybaveno klimatickou (teplotní) komorou s dostatečně přesným systémem řízení teploty. [1,8].



Obr. 4 Schéma uspořádání zkoušky: 1 - Penetrátor (razník), 2 - Horní přítlačná matrice, 3 - Zkušební těleso, 4 - Spodní matrice, 5 - Snímač posunutí

## 5.1 Experimentální uspořádání a rozdělení metod SPT

Protlačovací zkoušky na miniaturních discích lze kategorizovat z různých hledisek. Pravděpodobně nejpoužívanějším hlediskem je časová závislost zkoušky. Toto hledisko určuje, s jakou standardní mechanickou zkouškou bude možné zkoušku SPT korelovat a které mechanické charakteristiky tak bude možné určovat. Například analogií ke zkoušce tahem je metoda SPT s konstantní rychlostí posuvu; u obou zkoušek je rychlost posuvu razníku nebo rychlost posuvu příčnicku zkušebního stroje v průběhu celé zkoušky konstantní. Jiným parametrem, podle kterého lze dělit zkoušky SPT je způsob uložení vzorku v matrici. Dalšími hledisky pro dělení zkoušek SPT může být např. teplota, za kterých zkouška probíhá nebo geometrie (tvar) penetrátoru.

### 5.1.1 Řízená veličina, časová závislost

Podle časové závislosti lze zkoušky SPT rozdělit na zkoušky

- *s konstantní rychlostí posuvu* (Constant Displacement Rate, CDR), tzn. zkoušky časově nezávislé.  
Vyhodnocována je závislost síla-průhyb, jak je znázorněno na obr. 5a. Zkouška může probíhat v rozpětí od kryogenních teplot až po teploty zvýšené. Jedná se o analogii tahové zkoušky [14].

Podmínky zkoušení jsou uvedeny v druhé části dokumentu CWA 15627:2007 A Code of Practice for Small Punch Testing for Tensile and Fracture Behaviour [8];

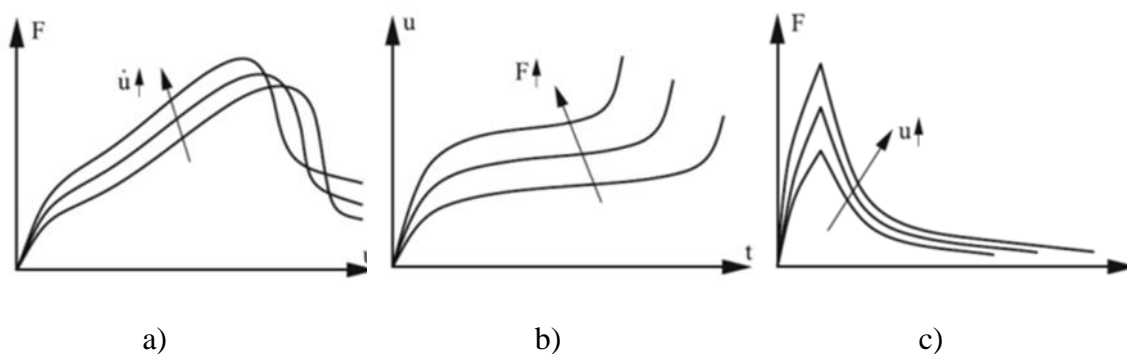
- *s konstantním zatížením* (Constant Force – CF), tj. zkoušky časově závislé.

Jak je patrné z názvu, síla působící na vzorek je po celou dobu zkoušky konstantní. Zkouška je obvykle prováděna za zvýšených teplot v prostředí s ochrannou atmosférou. Oproti předchozímu typu se zaznamenává závislost síla-čas, příp. napětí-čas, viz obr. 5b. Lze říci, že tento typ zkoušky je analogií klasické zkoušky tečení (creepové zkoušky);

Podmínky a doporučení, týkající se uvedeného typu zkoušky jsou obsaženy v dokumentu CWA 15627:2007 PART A: A Code of Practice for Small Punch Creep testing [8];

- *s konstantní celkovou deformací* (Relaxation – R)

Princip zkoušky je analogií relaxační tahové zkoušky. Ve vzorku je vyvoláno výchozí napětí, které za určitý čas relaxuje (zmenšuje svoji hodnotu) v důsledku zvýšené teploty. Velikost elastické deformace se snižuje na úkor deformace plastické, celková deformace zůstává konstantní. Průběh síly odpovídající napětí ve vzorku na čase je uveden na obrázku 5c.



Obr. 5 Tvar křivek v závislosti na neměnné veličině: a) Constant displacement rate – CDR, b) Constant force – CF, c) Relaxation – R [9]

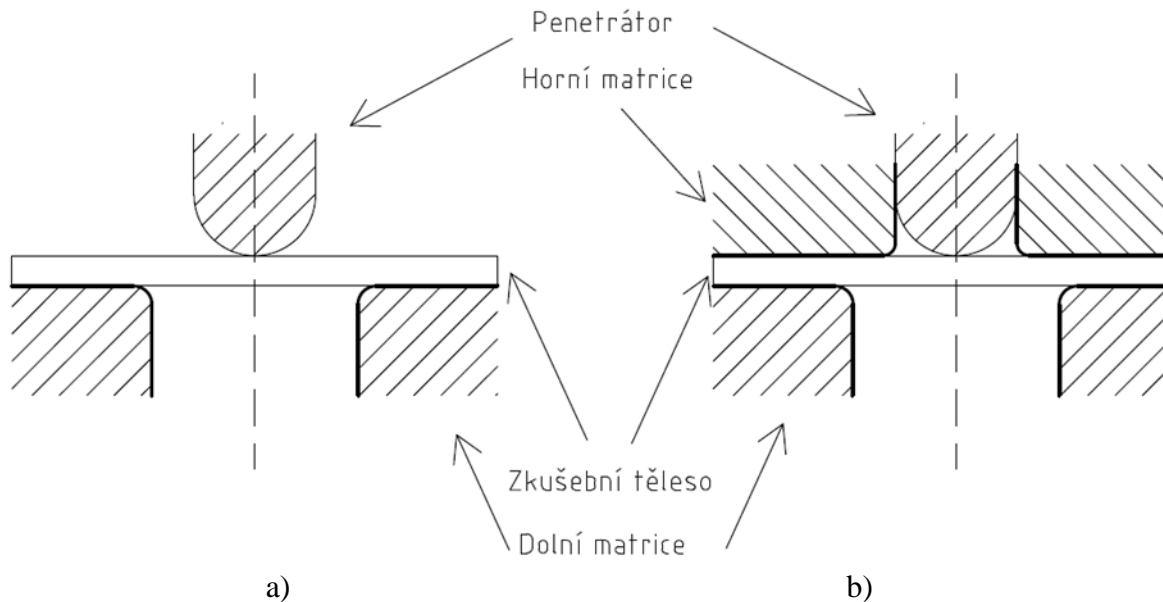
Z grafu na obr. 5a je patrný vliv rychlosti zatěžování u zkoušky CDR. Lze pozorovat zvýšení charakteristických sil za současného snížení velikosti deformace s rostoucí rychlostí zatěžování. V grafu zobrazeném na obr. 5b je znázorněn růst průhybu vzorku v závislosti na čase pro několik úrovní síly pro případ způsobu zatěžování CF. Graf na obr. 5c ukazuje spojitost mezi nárůstem průhybu vzorku a výchozí silou (napětím).

### 5.1.2 Upnutí zkušebních těles

Z hlediska způsobu upnutí zkušebních těles do zkušebního zařízení (přípravku) lze zkoušky SPT rozdělit na:



- *Punch drawing test* – zkušební těleso je položeno na dolní matrici bez přidržení viz obr. 6a.
- *Bulge punch test* – vzorek je sevřen mezi matricemi, jako je tomu na obr. 6b. V tomto případě je povolen větší rozměr tělesa. Sevřená část by měla být větší, než je třetina povrchu vzorku. [8]



Obr. 6 Způsob uložení zkušebního tělesa při Punch drawing testu (a) a Bulge punch testu (b)

### 5.1.3 Teplota zkoušky

- *SPT za zvýšených teplot*, tj. vyšších než je teplota pokojová  
Tuto skupinu zkoušek lze dále rozdělit na zkoušky, kdy k porušení dochází creepovým mechanismem (obvykle zkoušky typu CF) a na zkoušky, při kterých ke creepu materiálu nedochází (obvykle zkoušky typu CDR);
- *SPT za pokojových teplot*;
- *SPT za snížených teplot*, tj. nižších než je teplota pokojová.

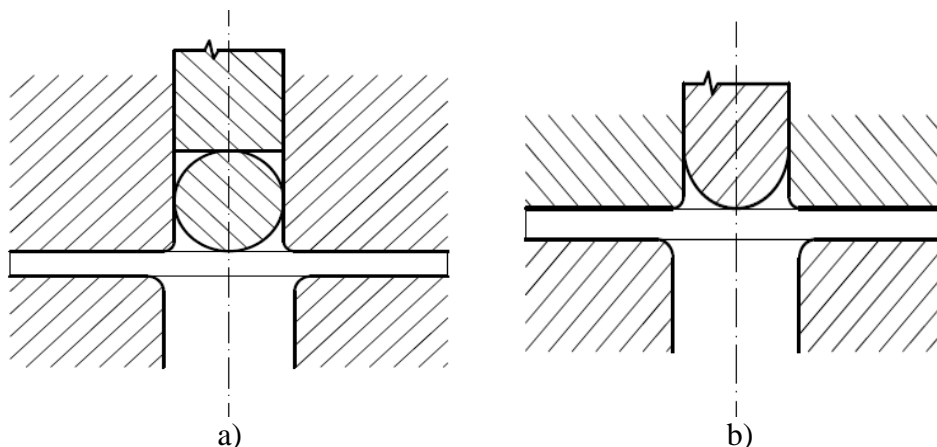
### 5.1.4 Geometrie razníku

Podle geometrie penetrátoru lze zkoušky SPT dělit do následujících kategorií:

- *Kuličkový penetrační test* (ball punch test)

Penetrátorem je kulička (obr. 7a) nebo razník s hemisférickým koncem (obr. 7b). Často se v tomto případě používá typ uchycení vzorku Bulge Punch Test. Při zkoušce se penetrátor protlačuje vzorkem až do jeho porušení. Kulička může být z kalené oceli nebo keramiky, například  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , WC [10]. Pokud se test provádí za zvýšených teplot, může být razník vyroben i z niklových superslitin, například ze slitiny z rodiny Nimonic [15].

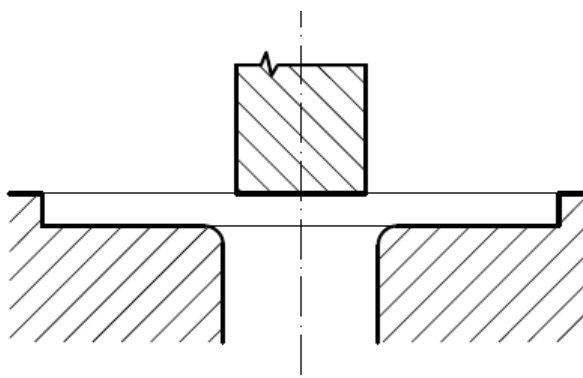
Podle CEN [8] je doporučená rychlost posuvu razníku  $(0,2 \div 2)$  mm/min, poloměr penetrátoru  $(1 \div 1,25)$  mm a sražení hrany dolní matrice  $2 \text{ mm} \times 45^\circ$ . Tento způsob uspořádání je vhodný pro stanovení meze kluzu a pevnosti.



Obr. 7 Schéma ball punch testu s penetrátorem kuličkou (a) a penetrátorem ve tvaru tyče s hemisférickým zakončením (b)

- *Střihový penetrační test (shear punch test)*

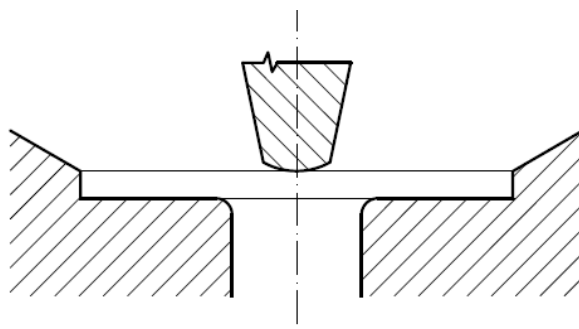
V tomto uspořádání se používá ostrohranný kruhový razník, jak je znázorněno na obr. 8. Zatěžování zkušebního tělesa probíhá až do jeho porušení. Preferovaným uspořádáním je stejně jako v předchozím případě uspořádání s přidržovaným okrajem zkušebního tělesa (Bulge punch test). Střihový penetrační test se s výhodou používá pro stanovení meze kluzu. Na rozdíl od kuličkového penetračního testu je deformace soustředěna na relativně malou část v okolí razníku. Závislost síla  $F$  – posunutí  $u$  připomíná závislost síla – prodloužení získané pomocí standardní tahové zkoušky. [1]



Obr. 8 Uspořádání střihového penetračního testu

- *Ohybový penetrační test (disc bend test)*

V případě tohoto typu testu se nejčastěji používá uspořádání s volně uloženým zkušebním tělesem (Punch drawing test). Razník má tvar kuželu s kulovým zakončením, viz obr. 9.



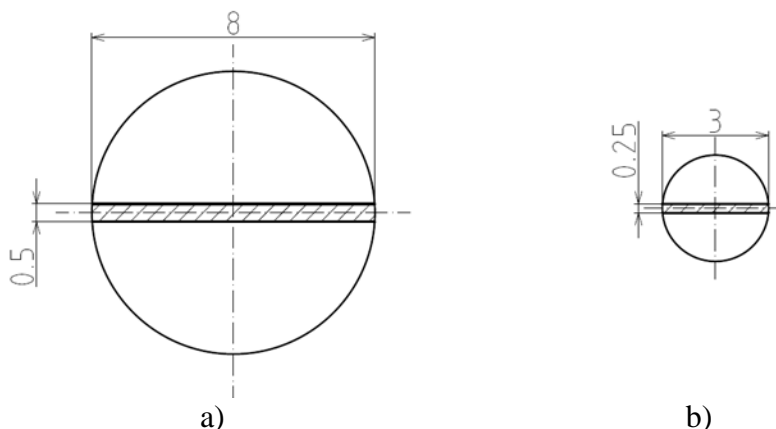
Obr. 9 Uspořádání ohybového penetračního testu

Dokument CEN doporučuje, z důvodu zabránění deformací penetrátoru a matric v průběhu testu tvrdost alespoň 55 HRC.

#### 5.1.5 Geometrie zkušebního tělesa

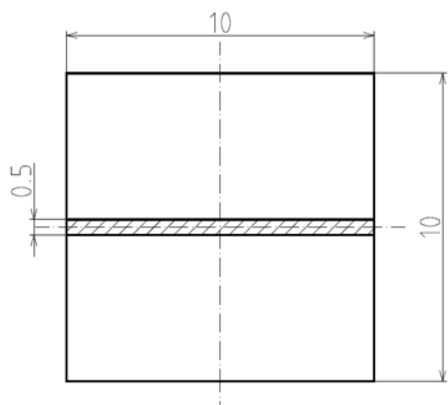
Tvar a rozměry zkušebních těles užívaných pro penetrační testy se řídí doporučeními, uvedenými v dokumentu CEN [8]. Obecně lze z hlediska geometrie zkušební tělesa pro SPT rozdělit na:

- *kruhová zkušební tělesa*
  - průměr 8 mm, tloušťka 0,5 mm (obr. 10a) doporučená v [8];
  - průměr 3 mm, tloušťka 0,25 mm (Obr. 10b) – rozměry používané v USA a Japonsku, jedná se v podstatě o vzorky pro transmisní elektronovou mikroskopii. Někdy se zkoušky prováděné na tomto typu disků označují jako Super Small Punch Test [16].



Obr. 10 Schematický náčrtek kruhových zkušebních těles

- *čtvercová zkušební tělesa*
  - rozměr  $10 \times 10$  mm, tloušťka 0,5 mm, resp. 0,25 mm



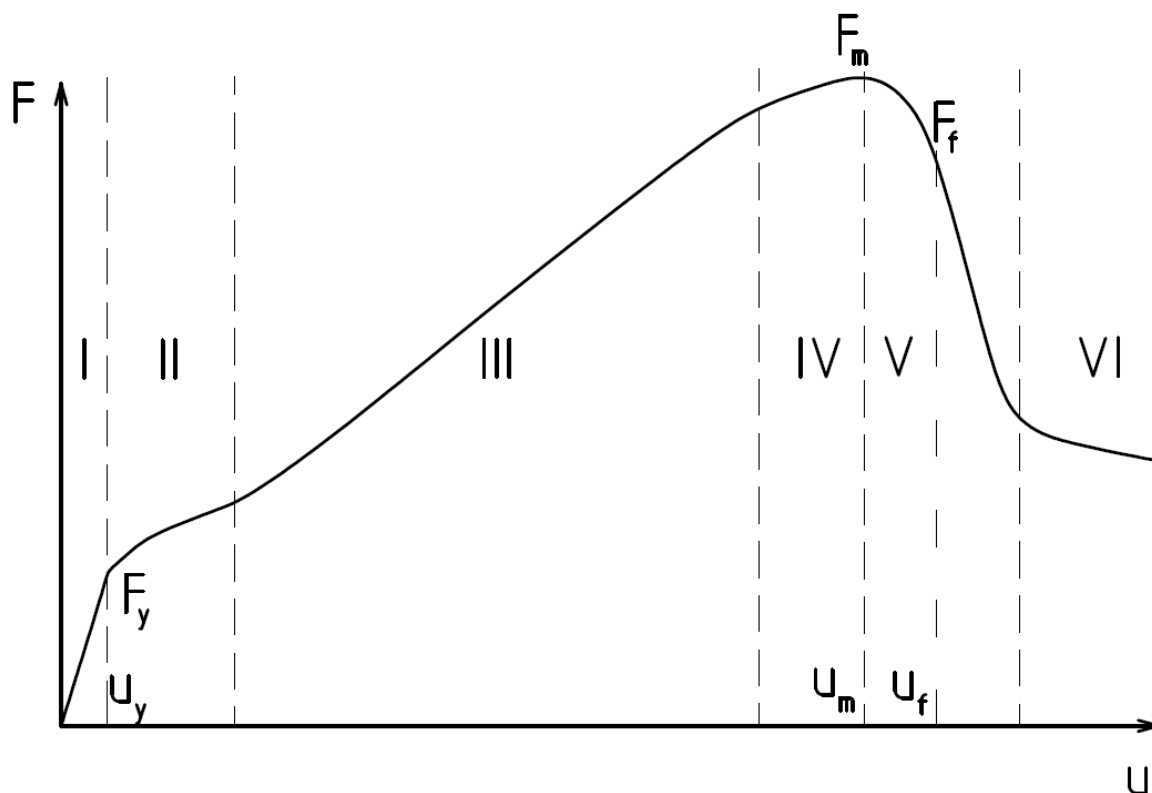
Obr. 11 Schematický náčrt čtvercového zkušebního tělesa

- *nestandardní zkušební tělesa*

V práci [17] autoři používají zkušební tělesa tvaru elipsy pro hodnocení radiačního zkřehnutí zirkoniové slitiny. Důvodem použití eliptických těles byla potřeba vytvořit ve vzorku biaxiální napětí, které vede k šíření trhliny v podélném směru vzorku (ve směru delší poloosy elipsy) a lépe tak popisuje situaci při porušení tlakové trubky.

## 6. Popis závislosti síla $F$ – průhyb $u$

Typickou závislost síly na posunutí razníku při kuličkovém penetračním testu reprezentuje graf na obr. 12. Ze závislosti  $F - u$  je možné určit řadu veličin, které lze na základě modelových představ a empirických vztahů korelovat s výsledky standardních mechanických zkoušek.



Obr. 12 Typický graf závislosti síla  $F$  – průhyb  $u$  při zkoušce CDR u houževnatého materiálu

Z grafu na obr. 12 je patrné, že závislost  $F - u$  můžeme rozdělit na několik charakteristických oblastí, vymezených následujícími veličinami:

$F_y$	[N]	síla charakterizující přechod z elastické do plastické oblasti
$F_m$	[N]	maximální dosažená síla
$F_f$	[N]	lomová síla, smluvně definována jako $0,8 \cdot F_m$
$u_y$	[mm]	průhyb odpovídající síle přechodu z elastické do plastické oblasti
$u_m$	[mm]	průhyb při dosažení maximální síly
$u_f$	[mm]	průhyb odpovídající lomové síle

Každá z oblastí závislosti je charakteristická jinou odezvou materiálu vzorku na mechanické zatěžování, například přechod z oblasti elastické deformace do oblasti plastické, čímž se od sebe oddělují oblasti I a II. Dalším významným mezníkem, separujícím oblast IV a V, je globální maximum grafu – maximální dosažená síla  $F_f$ .

## **Oblast I**

Zkušební vzorek je zatěžován pouze bodovým tlakem od penetrátoru. Z grafu je patrné, že průběh zatěžování má lineární charakter a vyjma možných mikroplastických deformací v oblasti styku penetrátoru a zkušebního tělesa, dochází pouze k elastické deformaci. Pokud vzorek odlehčíme kdykoli v průběhu první oblasti, vrátí se zpět do svého původního stavu.

## **Oblast II**

Tato oblast, někdy označovaná jako plastický ohyb [6], se vyznačuje postupnou plastickou deformací v místech, kde se stýká penetrátor se vzorkem. V této oblasti již není zatěžování lineární a dochází ke zpomalení zatěžování.

## **Oblast III**

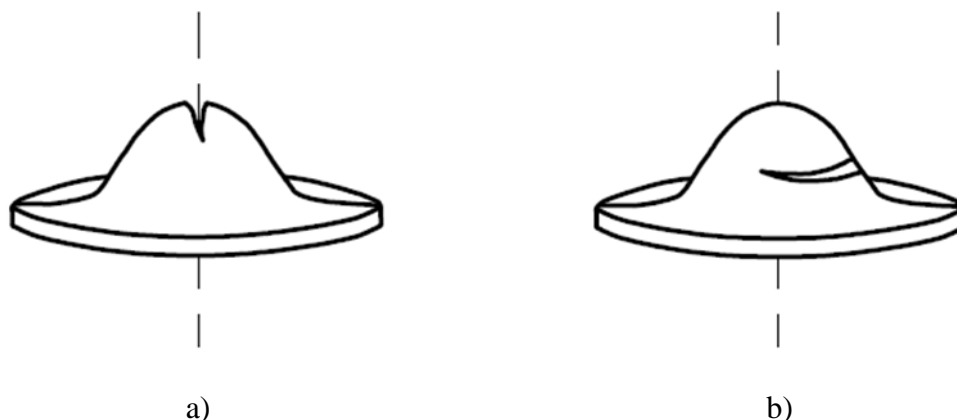
Plastická deformace nabude takových hodnot, že vzorek začne obepínat penetrátor, hovoří se zde o tzv. membránovém protahování a materiál se výrazně deformačně zpevňuje, což je důsledkem zvětšení plochy kontaktu mezi oběma tělesy a tento jev je viditelný na záznamu. Membránové protahování je charakteristické pro houževnaté materiály, křehké materiály se často poruší ještě dříve, než je tento efekt viditelný.

## **Oblast IV**

Zde je patrné snížení sklonu křivky, které je vyvolané počátkem tvorby hrdla a jeho růstem, tedy ztenčením vzorku. Tato oblast končí maximem zatěžovací křivky a je tedy počátkem iniciace trhliny. Oblast poškození vzorku je soustředěna na ploše vzdálenější od penetrátoru [18] kvůli přítomnosti extrémního normálového tahového napětí v nejvzdálenějších vláknech.

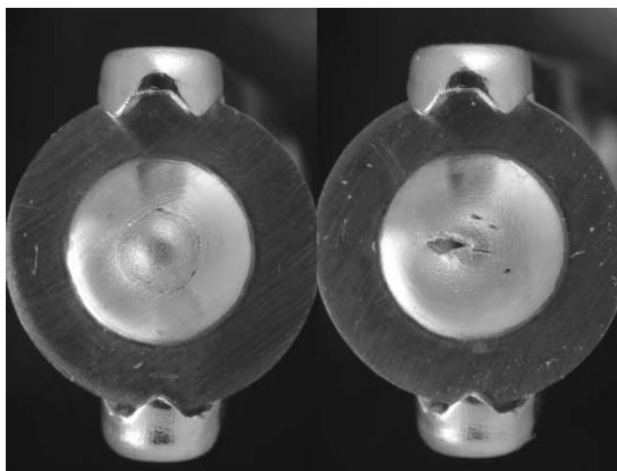
## **Oblast V**

V tomto stádiu již začínají být vizuálně zjištěitelné trhliny. Dochází k vyboulení vzorku díky dvouosému stavu napjatosti. Podle vlastností materiálu dochází buď k lomu podél této vybouleniny, nebo na jejím vrcholu. Místo vzniku trhliny je určeno polohou největšího smykového napětí přítomného ve vzorku. Pro křehké materiály je toto napětí lokalizováno na vrcholu a dochází pouze k malému průhybu vzorku před jeho porušením. U tohoto typu materiálů se proto tvoří trhliny ve tvaru „hvězdičky“ (obr. 13a). U houževnatých materiálů je naopak prohnutí vyšší a smykové napětí má své maximum v místech odkloněných přibližně o 45° od osy symetrie. Vzniká tedy trhlina ve tvaru „kloboučku“ (obr. 13b). Oblast V je zakončena finálním porušením zkušebního tělesa.



Obr. 13 Schematické znázornění charakteristického průběhu trhliny a) při lomu křehkého materiálu (tvar „hvězdičky“), b) při lomu houževnatého materiálu (tvaru „kloboučku“). [1]

V literatuře, např. [19], jsou zdokumentovány i případy, kdy došlo k nestandardnímu vývoji trhliny, viz vzorek v pravé části snímku na obr. 14. Nestandardním vývojem trhliny je myšlen vznik hlavní trhliny vlevo od středu vzorku a několika menších trhlín v blízkosti pravé části centra vzorku.



Obr. 14 Porušení zkušebního tělesa. Standardní porušení (vlevo) a nestandardní porušení (vpravo) [19]

## Oblast VI

Poslední oblast zahrnuje pouze sílu potřebnou na protlačení penetrátoru již porušeným zkušebním tělesem.

Ze závislosti síla  $F$  – průhyb  $u$  lze určit další veličiny, např.

$E^{\text{SP}}$	[J]	lomové energie – plocha pod křivkou závislosti $F - u$
$\varepsilon_f$	[-]	efektivní lomová deformace: $\varepsilon_f = \ln(h_0/h_f)$ , kde $h_0$ je počáteční tloušťka disku a $h_f$ je tloušťka nejtenčího místa po porušení
$T_{\text{SP}}$	[K]	tranzitní teplota stanovená pomocí penetrační zkoušky. Je definována jako teplota odpovídající aritmetickému průměru nejvyšší a nejnižší lomové energie

## 7. Stanovení materiálových charakteristik ze záznamu protlačovací zkoušky

V praxi se používají dva přístupy ke korelaci výsledků protlačovacích zkoušek na miniaturních discích s hodnotami veličin známých ze standardních mechanických zkoušek. Prvním a v současnosti pravděpodobně používanějším přístupem je empirická korelace. Princip empirické korelace spočívá v nalezení vzájemného vztahu mezi korelovanými veličinami, v ideálním případě popsaného lineární závislostí. Druhý přístup je založen na použití matematických modelů chování materiálu, využívajících metodu konečných prvků a teorii neuronových sítí. Tento postup je založen na numerických simulacích závislostí stanovených v průběhu tahových zkoušek a penetračních testů. Neuronová síť vytvoří vztahy mezi průběhy obou zkoušek a po dokončení fáze učení je schopna stanovit některé materiálové charakteristiky pouze na základě znalosti výstupní závislosti síla  $F$  – posunutí  $u$  i pro materiály, které nebyly součástí původní množiny materiálů. [1]

### 7.1 Stanovení napěťových vlastností

Některé z charakteristik popsaných v předchozích kapitolách se dají vyčíst přímo ze záznamu. Příkladem je maximální síla  $F_m$  (někdy označována, především v anglosaské literatuře, také jako  $P_m$ ), tj. maximální síla zjistitelná ze záznamu  $F - u$ .

Komplikace mohou nastat při stanovení síly  $F_y$ . Oblast přechodu z elastické do plastické deformační oblasti se nemusí projevit náhlým zlomem v závislosti  $F - u$ , podobně jako je tomu u tahové zkoušky pro materiály s nevýraznou mezí kluzu. Bylo proto vypracováno několik postupů, jak určení této hodnoty sjednotit. Znalost hodnoty  $F_y$  je klíčová pro další přepočty na mez kluzu určenou tahovou zkouškou a postupy jejího zjištění budou popsány v následujících kapitolách.

#### 7.1.1 Stanovení síly $F_m$

Maximální síla  $F_m$  je nejvyšším bodem na záznamu závislosti  $F - u$ . Určení tohoto bodu je jednoznačné a proto nepředstavuje komplikaci v metodice určení síly  $F_m$ .

#### 7.1.2 Stanovení síly $F_y$

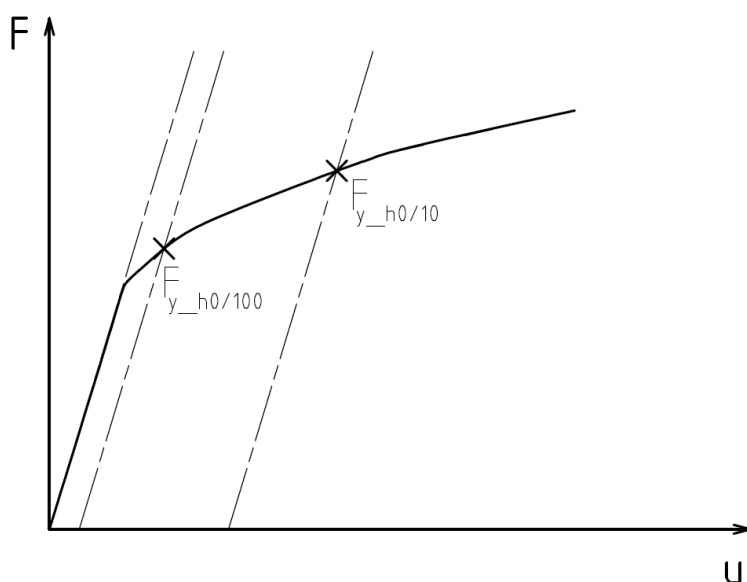
Nejrozšířenějšími metodami pro určení síly  $F_y$  odpovídající přechodu z elastické do plastické oblasti deformací jsou metoda offsetu a metoda dvou tangent. Oba způsoby určení  $F_y$  včetně několika dalších jsou rozebrány a znázorněny v následujících



odstavcích. V literatuře (zejména anglosaské) lze pro tuto sílu nalézt rovněž označení  $P_y$  nebo přechodová síla.

#### A) Metoda offsetu

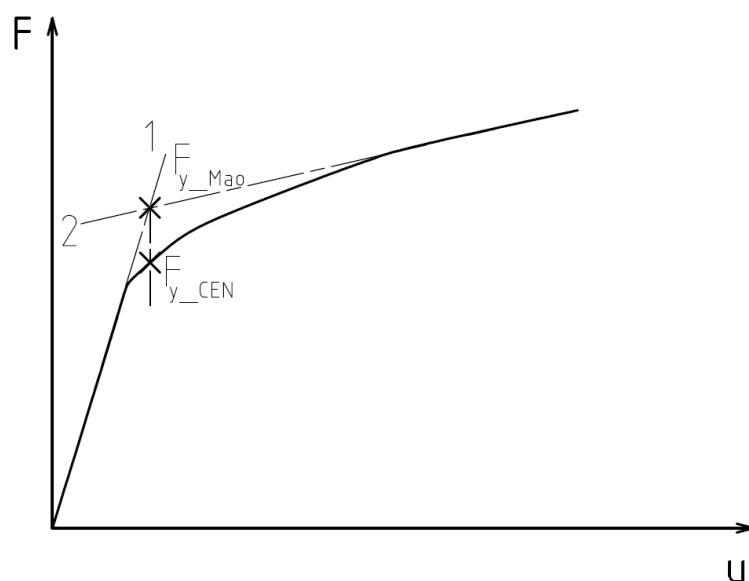
Metoda offsetu čerpá z metodiky určení smluvní meze kluzu  $R_{p0,2}$  při zkoušce tahem. Pro její stanovení se počáteční lineární část závislosti síla-posunutí razníku aproximuje přímkou, ke které je následně vytvořena rovnoběžka s horizontálním posunutím  $h_0/10$  nebo  $h_0/100$  (obr. 15), kde  $h_0$  je počáteční tloušťka zkušebního tělesa. Průmět průsečíku grafu závislosti  $F - u$  s danou rovnoběžkou do vertikální osy je pak hodnota  $F_y$ . Hodnoty takto stanovené se označují  $F_{y\_h0/10}$  a  $F_{y\_h0/100}$ . [20] Použití první, či druhé hodnoty závisí pouze na volbě autora měření. V některých případech je pravděpodobně lepší zvolit hodnotu, která bude lépe odpovídat tvaru grafu. Přestože se na první pohled hodnoty zdají podobné, v žádném případě se nedají volně zaměnit a výsledná závislost získaná korelací bude jiná pro každou z těchto hodnot.



Obr. 15 Princip metody offsetu

#### B) Metoda dvou tangent

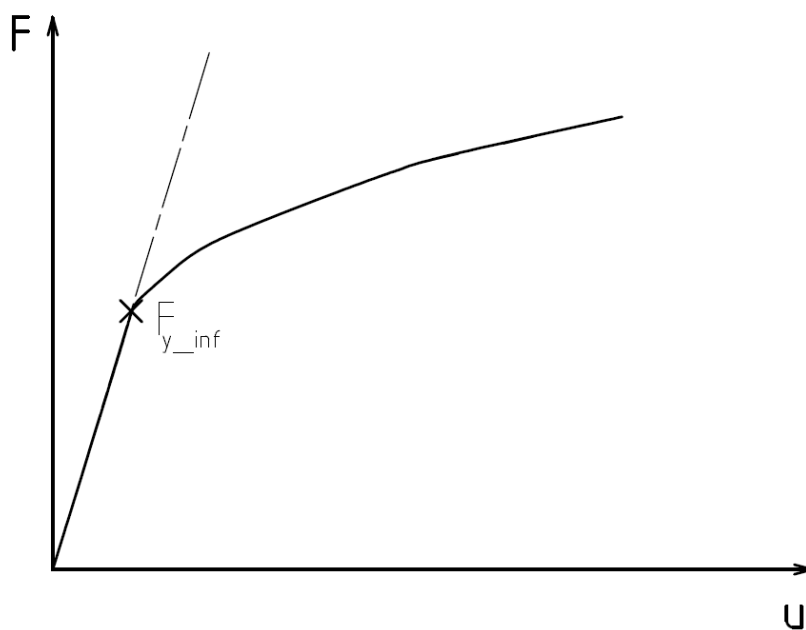
Metoda dvou tangent spočívá v proložení lineárních úseků závislosti  $F - u$  přímkami v oblastech I (přímka 1 v obr. 16) a II (přímka 2 v obr. 16). Průsečík vzniklý protnutím přímek 1 a 2 se bere jako přechodová síla a označuje se  $F_{y\_Mao}$  (po autorovi uvedeného postupu) [5]. Tato metoda byla později upravena Evropským výborem pro normalizaci. Změna spočívá ve spuštění svislice z průsečíku přímek 1 a 2, síla  $F_{y\_CEN}$  je určena jako průsečík spuštěné přímky s křivkou závislosti  $F - u$ .



Obr. 16 Princip metody dvou tangent

### C) Metoda inflexního bodu

Dalším možným způsobem určení síly  $F_y$  je metoda navržená v práci [21]. Síla  $F_{y\_inf}$  se určí v bodě odklonu od linearit v prvním úseku závislosti  $F-u$ . Schematicky je postup určení síly  $F_{y\_inf}$  znázorněn na obr. 17.



Obr. 17 Princip metody inflexního bodu

### 7.1.3 Stanovení síly $F_f$

Lomová síla  $F_f$  se smluvně stanovuje jako  $0,8 \cdot F_m$ .

## 7.2 Stanovení deformačních charakteristik

Z protlačovací zkoušky se pomocí korelace dá stanovit mnoho deformačních charakteristik materiálu. V praxi se především používá korelace hodnot zjištěných pomocí SPT a hodnot tažnosti  $A$ , příp. kontrakce  $Z$ , výjimečně skutečné deformace  $\bar{\epsilon}$ . Přestože se v průběhu zatěžování zkušebního tělesa pro protlačovací zkoušku netvoří krček, tak jak je tomu u zkušebních těles pro zkoušku tahem, vhodnou korelací jsme schopni nalézt vztahy spojující hodnoty kontrakce s hodnotami zjištěnými z protlačovací zkoušky.

### 7.2.1 Stanovení průhybu $u_m$ při maximální síle $F_m$

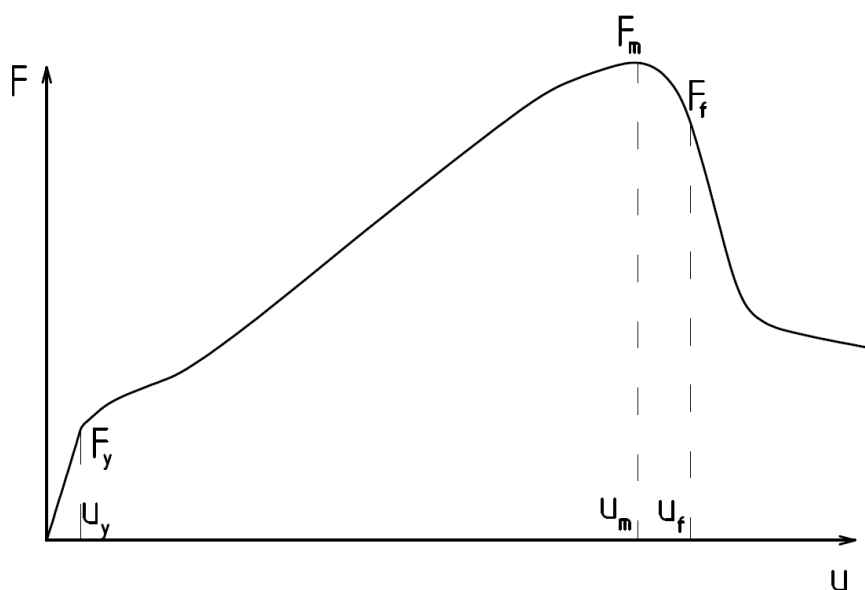
Průhyb  $u_m$  odpovídá maximální síle  $F_m$ . Určí se jako průmět síly  $F_m$  do horizontální osy, viz obr. 18.

### 7.2.2 Stanovení průhybu $u_y$ při síle $F_y$

Průhyb  $u_y$  odpovídá přechodové síle  $F_y$ . Určí se jako průmět síly  $F_y$  do horizontální osy, viz obr. 18.

### 7.2.3 Stanovení průhybu $u_f$ při lomové síle $F_f$

Průhyb  $u_f$  odpovídá síle na lomu  $F_f$ . Určí se jako průmět síly  $F_f$  do horizontální osy, viz obr. 18.



Obr. 18 Stanovení průhybu  $u_y, u_m$  a  $u_f$

## 7.3 Stanovení křehkolomových charakteristik

Za křehkolomové charakteristiky je možné považovat takové veličiny, které vyjadřují odolnost materiálu proti iniciaci nestabilního křehkého lomu v tělese s trhlinou, resp. charakteristiky odolnosti materiálu vůči vzniku křehkého lomu. V následujících

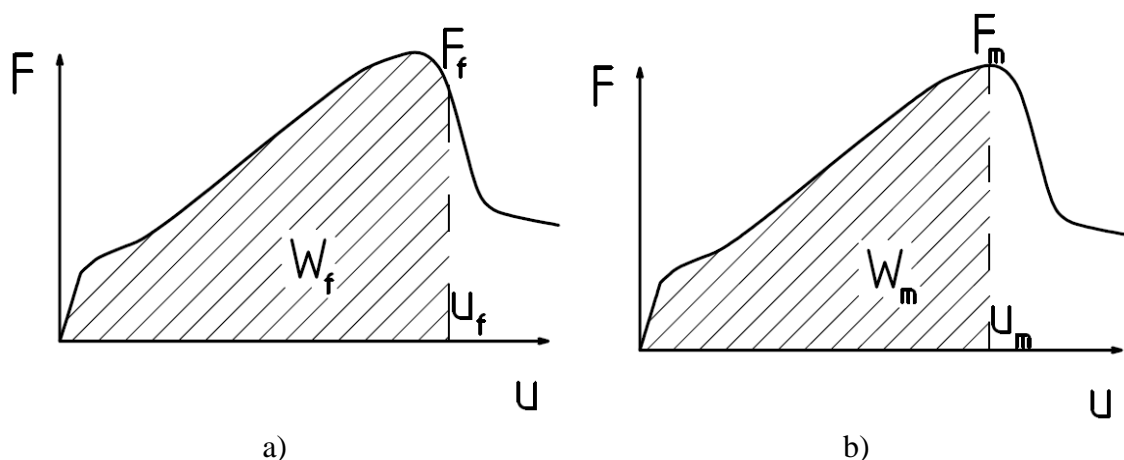
podkapitolách bude uveden postup při zjišťování parametrů potřebných pro vyhodnocení tranzitních teplot, lomové houževnatosti apod.

### 7.3.1 Stanovení absorbované energie $W_f$ a $W_m$

Energie absorbovaná zkušebním tělesem do maximální síly  $F_m$ , respektive lomové síly  $F_f$  má velmi podobný význam jako energie potřebná pro porušení vzorku při zkoušce rázem v ohybu. Lze určit následující hodnoty energie:

- a)  $W_f$  – absorbovaná energie do lomu tělesa [J]
- b)  $W_m$  – absorbovaná energie v okamžiku dosažení maximální síly [J]

Velikost energie potřebná pro porušení vzorku dává dobrou představu o chování materiálu z hlediska energetické náročnosti deformace, mechanismu lomu a šíření trhliny. Udává tedy jaké množství energie je materiál schopen přijmout před porušením, a tím vymezuje hranice jeho použitelnosti. Hodnota absorbované energie závisí na mnoha faktorech, například na krystalové mřížce matrice materiálu, teplotě, morfologii vyloučených fází, metalurgické čistotě materiálu a mnoha dalších. Pro její stanovení se využívá záznamu zkoušky, kde představuje plochu pod závislostí  $F - u$  do maximální síly, respektive do lomu, jak je ukázáno na obr. 19 [22].



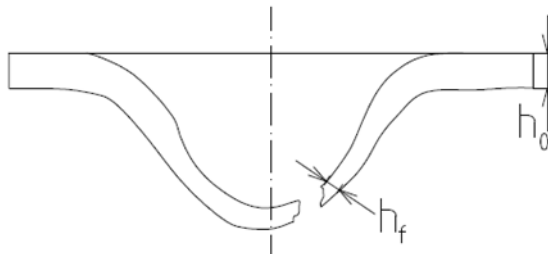
Obr. 19 Znáznornění absorbované energie do lomu (a) a do maximální síly (b)

### 7.3.2 Stanovení efektivní lomové deformace

Výpočet efektivní lomové deformace  $\varepsilon_f$  nelze provést přímo ze závislosti  $F - u$ . K jejímu výpočtu je nutná znalost tloušťky zkušebního tělesa po porušení. Konečná (minimální) tloušťka vzorku  $h_f$  se vyhodnotí na řezu porušeného vzorku, např. metodami obrazové analýzy. Měření musí být provedeno v blízkosti místa porušení, viz obr. 20. Vztah pro výpočet efektivní lomové deformace má tvar

$$\varepsilon_f = \ln \frac{h_0}{h_f}, \quad (1)$$

kde  $h_0$  je počáteční tloušťka vzorku,  $h_f$  tloušťka disku v místě porušení (minimální tloušťka vzorku).



Obr. 20 Místo měření minimální tloušťky vzorku

Efektivní lomová deformace se používá při korelaci dalších veličin, avšak již poměr počáteční a finální tloušťky vzorku, tedy argumentu logaritmu, dává představu o mechanismu lomu. Pokud například bude test proveden při kryogenních teplotách, je pravděpodobné, že finální tloušťka zkušebního tělesa  $h_f$  bude srovnatelná s počáteční tloušťkou  $h_0$  a poměr  $h_0/h_f$  se bude blížit jedné. Z toho můžeme usuzovat, že nedošlo k významnému plastickému přetvoření v oblasti trhliny a lom můžeme předběžně označit na štěpný nebo interkrystalický. Naopak, pokud bude poměr větší než jedna, můžeme předpokládat, že v průběhu zkoušky došlo k výrazné plastické deformaci a následně si tak udělat představu o mechanismu a energetické náročnosti lomu.

## 8. Přepočet materiálových charakteristik

### 8.1 Přepočet napět'ových charakteristik

Jak vyplývá z předchozích odstavců, napět'ové, deformační ani jiné charakteristiky nelze určit přímo ze záznamu protlačovací zkoušky na miniaturních discích. Ke zjištění hodnot známých ze zkoušky tahem je tedy nutno nalézt přepočtové rovnice. Některé jsou popsány v následujícím odstavci.

#### 8.1.1 Přepočet síly $F_m$ na mez pevnosti

Rovnice popisující vztah mezi mezí pevnosti  $R_m$  zjištěné zkouškou tahem a maximální silou  $F_m$  určené protlačovací zkouškou mají často tvar

$$R_m = \alpha_1 \frac{F_m}{h_0^2} + \alpha_2, \quad (2)$$

resp.

$$R_m = \alpha_3 \frac{F_m}{h_0} + \alpha_4, \quad (3)$$

kde  $R_m$  je přepočtená mez pevnosti,  $\alpha_1$  a  $\alpha_2$  jsou regresní parametry přímky zjištěné ze závislosti  $F_m$  na  $R_m$ ,  $F_m$  je maximální síla dosažená při zkoušce a  $h_0$  je počáteční tloušťka disku. Rozdíl mezi rovnicemi (2) a (3) spočívá v mocnině jmenovatele. Umocněním tloušťky disku na jeho druhou mocninu pouze zvětšíme lineární člen závislosti. Tento rozdíl je pak zahrnut v koeficientu  $\alpha_3$  a vztah ve výsledku tedy nemodifikuje. Autoři práce [20] však uvádí lepší korelaci výsledků pro vztah (3). Jedna z prvních rovnic, sloužících k přepočtu meze pevnosti byla publikována v práci Maa a Takahashiho [6] v roce 1988 pro materiál tlakových nádob 2,25Cr1Mo

$$R_m[\text{MPa}] = 130 \frac{F_m}{h_0^2} \left[ \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2} \right] - 320. \quad (4)$$

Jiný tvar rovnice, resp. hodnoty v ní obsažených koeficientů byl publikován v práci Guana a Wanga [23]

$$R_m[\text{MPa}] = 0,0666 \frac{F_m}{h_0^2} \left[ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right] + 146,03. \quad (5)$$

Rov. (5) byla vytvořena pro skupinu přibližně 60 materiálů, ve které byly nízkolegované oceli na tlakové nádoby, austenitické, konstrukční i vysokopevné oceli. Je zřejmé, že koeficienty rovnic se značně liší. Autoři používají různý řád jednotek, je tedy zřejmé, že se přepočtové vztahy nedají zaměňovat.

Jako dobrým doplňujícím parametrem se ukázala být hodnota průhybu  $u_m$  při dosažení maximální síly  $F_m$ . Ten uplatňuje při přepočtu ve své rovnici například Matocha [24] pro uhlíkovou ocel K22, rovnice má tvar:

$$R_m[\text{MPa}] = 0,51 \frac{F_m}{h_0 \cdot u_m} \left[ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right] - 172,3. \quad (6)$$

Autoři práce [25] stanovili vhodný přepočet pro oceli využívané v energetickém průmyslu (např. ocel 12Cr1MoV) ve tvaru

$$R_m[\text{MPa}] = 0,184 F_m[\text{N}] \pm 53. \quad (7)$$

Contreras, Rodríguez a kol. uvedli v práci [22] pro feriticko-perlitickou ocel pro svařované konstrukce S460NL po mechanicko-tepelném zpracování přepočtový vztah ve tvaru

$$R_m[\text{MPa}] = 0,051 \frac{F_m}{h_0^2} \left[ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right] + 269. \quad (8)$$

V rámci experimentální části bakalářské práce byly na ÚMVI provedeny tři protlačovací zkoušky na miniaturních discích oceli S235JRC, viz Příloha 2. Byla provedena také zkouška tahem, jejíž výsledky jsou uvedeny v Příloze 1. Ze zatěžovacích křivek protlačovací zkoušky byly určeny hodnoty maximálních zátěžných sil, viz tab. 2. Rozptyl naměřených hodnot  $F_m$  je prakticky zanedbatelný.

Tabulka 2 Hodnoty sil  $F_m$  oceli S235 JRC

	Měření 1	Měření 2	Měření 3
$F_m$ [N]	1296	1296	1292

Hodnoty uvedené v tab. 2 jsou použity pro výpočet meze pevnosti uvedeného materiálu pomocí dříve uvedených korelačních vztahů. Standardní zkouškou tahem byla naměřena mez pevnosti  $R_m = 443$  MPa, viz Příloha 1. Nejlepší shody dosahuje rovnice Guana a Wanga, rov. (5). Je to pravděpodobně způsobeno tím, že rov. (5) byla sestavena pro velké množství rozdílných ocelí, kdežto ostatní rovnice jsou navrženy pro jeden konkrétní materiál nebo poměrně úzkou skupinu materiálů. Vypočtené hodnoty jsou uvedeny v tab. 3.

Tabulka 3 Srovnání vypočtených mezí pevnosti

	Měření 1 $R_m$ [MPa]	Měření 2 $R_m$ [MPa]	Měření 3 $R_m$ [MPa]	Zkouška tahem $R_m$ [MPa]
Rov. (4)	354	354	352	443
Rov. (5)	491	491	490	
Rov. (6)	594	596	595	
Rov. (7)	238	238	237	
Rov. (8)	533	533	532	

### 8.1.2 Přepočet síly $F_y$ na mez kluzu

Pro určení meze kluzu materiálu korelací výsledků protlačovací zkoušky je nutno nejprve znát sílu  $F_y$ , jejíž určení je podrobně popsáno v kap. 7.1.2. Používaný typ přepočtové rovnice je velmi podobný vztahu pro zjištění meze pevnosti (viz rov. (2))

$$R_e = \beta_1 \frac{F_y}{h_0^2} + \beta_2, \quad (9)$$

kde  $R_e$  je přepočtená mez kluzu,  $\beta_1$  a  $\beta_2$  jsou regresní parametry. Mez kluzu se i zde často označuje jako  $R_{p0,2}$ .

Příkladem konkrétních rovnic mohou být následující vztahy.

Mao, Takahashi [6]

$$R_e[\text{MPa}] = 360 \frac{F_y}{h_0^2} \left[ \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2} \right] \quad (10)$$

Guan, Wang [23]

$$R_e[\text{MPa}] = 0,4847 \frac{F_y}{h_0^2} \left[ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right] + 21,359 \quad (11)$$

Lacalle, Alvarez [26]

$$R_e[\text{MPa}] = 5,98 F_y[\text{N}] \quad (12)$$

Contreras, Rodríguez a kol. [22]

$$R_e[\text{MPa}] = 0,268 \frac{F_y}{h_0^2} \left[ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right] + 207 \quad (13)$$

Stejně, jako je tomu u přepočtových vztahů pro korelaci meze pevnosti, i zde si jednotky obou stran rovnice v některých případech odpovídají, avšak vztah  $F_y/h_0^2$  neodkazuje na klasické pojetí napětí ve smyslu síly na plochu. Některé rovnice, například rov. (12) naopak jednotkově nevychází a jedná se tak v obou případech o korelaci, nikoli exaktní výpočet.

Tabulka 4 Síly  $F_y$  oceli S235 JRC zjištěné různými metodami

Metoda	Měření 1 [N]	Měření 2 [N]	Měření 3 [N]
$F_{y\_h0/10}$	249	192	250
$F_{y\_h0/100}$	134	80	123
$F_{y\_MAO}$	223	177	197
$F_{y\_CEN}$	168	105	165

Podobně jako v předchozí kapitole byla provedena korelace naměřených hodnot pomocí rov. (10) až (13). Ze zátěžných křivek naměřených v rámci experimentální části práce byly určeny hodnoty sil  $F_y$  různými metodami, viz Příloha 3. Tahovou zkouškou byla naměřena hodnota meze kluzu  $R_e = 355 \text{ MPa}$ , viz Příloha 1. Pokud porovnáme výše zmíněné metody určení síly  $F_y$  (kap. 7.1.2), zjistíme, že se hodnoty  $F_y$  podstatně liší. Z tohoto důvodu nelze jednotlivé metody mezi sebou volně zaměňovat. Hodnoty  $F_y$  jsou uvedeny v tab. 4, výsledky přepočtů pomocí korelačních vztahů v tab. (5) až (8).



U každé korelace by mělo být zmíněno, jakým postupem byla síla  $F_y$  určena a jaká rovnice byla použita pro další výpočty.

Tabulka 5 Korelace sil  $F_y$  a meze kluzu pomocí rov. (10)

Hodnota $F_y$	Měření 1 [MPa]	Měření 2 [MPa]	Měření 3 [MPa]	Zkouška tahem $R_e$ [MPa]
$F_{y\_h0/100}$	193	115	178	355
$F_{y\_h0/10}$	359	276	360	
$F_{y\_MAO}$	321	154	238	
$F_{y\_CEN}$	241	153	238	

Tabulka 6 Korelace sil  $F_y$  a meze kluzu pomocí rov. (11)

Hodnota $F_y$	Měření 1 [MPa]	Měření 2 [MPa]	Měření 3 [MPa]	Zkouška tahem $R_e$ [MPa]
$F_{y\_h0/100}$	281	176	260	355
$F_{y\_h0/10}$	504	394	505	
$F_{y\_MAO}$	454	365	402	
$F_{y\_CEN}$	346	228	342	

Tabulka 7 Korelace sil  $F_y$  a meze kluzu pomocí rov. (12)

Hodnota $F_y$	Měření 1 [MPa]	Měření 2 [MPa]	Měření 3 [MPa]	Zkouška tahem $R_e$ [MPa]
$F_{y\_h0/100}$	801	479	738	355
$F_{y\_h0/10}$	1489	1149	1493	
$F_{y\_MAO}$	1333	639	988	
$F_{y\_CEN}$	1002	639	988	

Tabulka 8 Korelace sil  $F_y$  a meze kluzu pomocí rov. (13)

Hodnota $F_y$	Měření 1 [MPa]	Měření 2 [MPa]	Měření 3 [MPa]	Zkouška tahem $R_e$ [MPa]
$F_{y\_h0/100}$	351	293	339	355
$F_{y\_h0/10}$	474	413	475	
$F_{y\_MAO}$	446	397	418	
$F_{y\_CEN}$	387	323	384	

Rov. (12) se ukázala jako nejméně vhodná pro všechna měření. Nejlepší shodu s mezi kluzu naměřenou tahovou zkouškou vykazuje rov. (13) při zjištění síly  $F_y$  metodou offsetu ( $h_0/100$ ), příp. rov. (11) při použití metody CEN.

## 8.2 Přepočet deformačních charakteristik

### 8.2.1 Přepočet posunutí $u_m$ na tažnost $A$

Pro určení tažnosti se využívá znalosti posunutí při maximální síle  $u_m$ . Rovnice má potom tvar

$$A_{SPT}[\%] = \gamma u_m, \quad (14)$$

kde  $\gamma$  je regresní parametr. Autoři práce [27] uvádí přepočtovou rovnici

$$A_{SPT}[\%] = \gamma \frac{u_m}{h_0}. \quad (15)$$

Tato změna je pouze formální, protože oproti předchozí rovnici se regresní parametr  $\gamma$  zvětší dvojnásobně, pokud bude tloušťka disku 0,5 mm.

Autoři článku [27] uvádí, že regresní parametr  $\gamma$  je 7 pro ocel 30CrMo5-2. Ze zatěžovacích křivek v příloze 3 bylo určeno posunutí  $u_m$  pro všechna měření. Výsledky jsou uvedeny v tab. 9.

Tabulka 9 Posunutí razníku  $u_m$  odpovídající síle  $F_m$

	Měření 1	Měření 2	Měření 3
$u_m$ [mm]	1,724	1,719	1,717

Zkouškou tahem byla naměřena tažnost 32,05 %, viz příloha 1. Výsledky korelace pomocí rov. (15) jsou uvedeny v tab. 10.

Tabulka 10 Korelace tažnosti  $A_{SPT}$  a  $u_m$  pomocí rov. (15)

	Měření 1	Měření 2	Měření 3	Zkouška tahem
	[%]	[%]	[%]	A [%]
$A_{SPT}$	24,13	24,07	24,04	32,05

Korelace hodnot pomocí rov. (15) vykazuje malý rozptyl výsledků, ale její použití pro ocel S235 JRC není ideální.

### 8.2.2 Přepočet sil $F_y$ a $F_m$ na skutečnou deformaci $\bar{\epsilon}$

Korelace síly  $F_y$  a  $F_m$  a skutečné deformace  $\bar{\epsilon}$  zjištěné tahovou zkouškou je možná pomocí exponentu deformačního zpevnění, určeného pomocí stříhové protlačovací zkoušky [28]. Abychom exponent mohli spočítat, musíme nejprve určit stříhové napětí  $\tau_y$  na přechodu elastické a plastické zóny a stříhové napětí  $\tau_m$  při maximálním zatížení.

Střihové napětí  $\tau$  v tomto případě odkazuje na fakt, že bylo měřeno střihovým penetračním testem a nejedná se tedy o mez pevnosti ve střihu. Rovnice pro zjištění výše zmíněných napětí má tvar

$$\tau_{y,m} = \frac{F_{y,m}}{2\pi r h_0}, \quad (16)$$

kde  $r$  je poloměr razníku. Z rovnic pro zpevnění materiálu lze odvodit vztah pro závislost poměru meze kluzu k mezi pevnosti a exponentu deformačního zpevnění. Po úpravě a dosazení střihových napětí dostaneme rovnici ve tvaru

$$\left(\frac{n_\tau}{0,002}\right)^{n_\tau} = \frac{\tau_m}{\tau_y}, \quad (17)$$

kde  $n_\tau$  je exponent deformačního zpevnění zjištěný protlačovací zkouškou. Mezi  $n_\tau$  a  $\bar{\varepsilon}$  existuje lineární závislost, např. pro ocel EN 10CrMo 9-10, ČSN 15 313 ji lze psát jako [28]

$$\bar{\varepsilon} = 1,174 n_\tau + 0,012. \quad (18)$$

### 8.2.3 Přepočet posunutí $u_f$ a $u_y$ na kontrakci $Z$

K výpočtu kontrakce se využívá rozdíl posunutí (přemístění) razníku na přechodu elastického a plastického stavu  $u_y$  a posunutí v okamžiku lomu  $u_f$ .

$$Z_{\text{SPT}}[\%] = \frac{u_f - u_y}{h_0}. \quad (19)$$

$Z_{\text{SPT}}$  značí, že kontrakce byla vypočítána pomocí protlačovací zkoušky na miniaturních discích (v literatuře se často používá označení RA, reduction in area). Korelační vztah má tvar

$$Z[\%] = \delta_1 Z_{\text{SPT}}[\%] + \delta_2, \quad (20)$$

kde  $Z$  označuje kontrakci stanovenou zkouškou tahem,  $\delta_1$  a  $\delta_2$  jsou regresní parametry přímky. Autoři práce [28] stanovili přepočtovou rovnici pro stejnou ocel jako v odstavci 8.2.2. ve tvaru

$$Z = 0,256 Z_{\text{SPT}} + 59,28. \quad (21)$$

Ze zatěžovacích křivek v Příloze 3 byly určeny hodnoty sil  $F_f$  pro všechna měření a k nim odpovídající posunutí  $u_f$ . Taktéž byly určeny hodnoty posunutí  $u_y$  pro jednotlivé metody zjištění síly  $F_y$ , výsledky jsou uvedeny v tab. 11. Posunutí  $u_{y\_CEN}$ , respektive

kontrakce  $Z_{CEN}$  nejsou v tabulce uvedeny, protože se jejich hodnoty shodují s posunutím  $u_{y\_MAO}$ , resp.  $Z_{MAO}$ . Kontrakce zjištěná ze zkoušky tahem je 69,2 %, viz Příloha 1.

Tabulka 11 Posunutí razníku odpovídající síle  $F_f$  a silám  $F_y$

	Měření 1 [mm]	Měření 2 [mm]	Měření 3 [mm]
$u_f$	2,150	2,151	2,167
$u_{y\_h0/100}$	0,035	0,018	0,055
$u_{y\_h0/10}$	0,108	0,082	0,159
$u_{y\_MAO}$	0,051	0,029	0,085

Výsledky korelace kontrakce  $Z_{SPT}$ , vypočtené z posunutí  $u_f$ ,  $u_y$  a kontrakce  $Z$  jsou uvedeny v tab. 12.

Tabulka 12 Korelace kontrakcí  $Z_{SPT}$  a  $Z$  pomocí rov. (21)

	Měření 1 $Z_{SPT}$ [%]	Měření 2 $Z_{SPT}$ [%]	Měření 3 $Z_{SPT}$ [%]	Zkouška tahem $Z$ [%]
$Z_{h0/100}$	60,36	60,37	60,36	69,2
$Z_{h0/10}$	60,33	60,34	60,30	
$Z_{MAO}$	60,35	60,34	60,34	

Z výsledků vyplývá, že metoda určení síly  $F_y$  a jí odpovídajícímu posunutí  $u_y$  nemá prakticky vliv na výslednou korelaci.

### 8.3 Přepočet křehkolomových charakteristik

Výpočet křehkolomových charakteristik materiálů, běžně určovaných standardními metodami (měření lomové houževnatosti, zkouška rázem v ohybu apod.) z výsledků protlačovacích zkoušek na miniaturních discích se provádí obdobně jako u napěťových a deformačních charakteristik pomocí korelačních vztahů. V následujících odstavcích budou stručně popsány vybrané křehkolomové charakteristiky materiálů a způsoby jejich přepočtu z výsledků protlačovacích zkoušek.

#### 8.3.1 Hodnocení tranzitního lomového chování

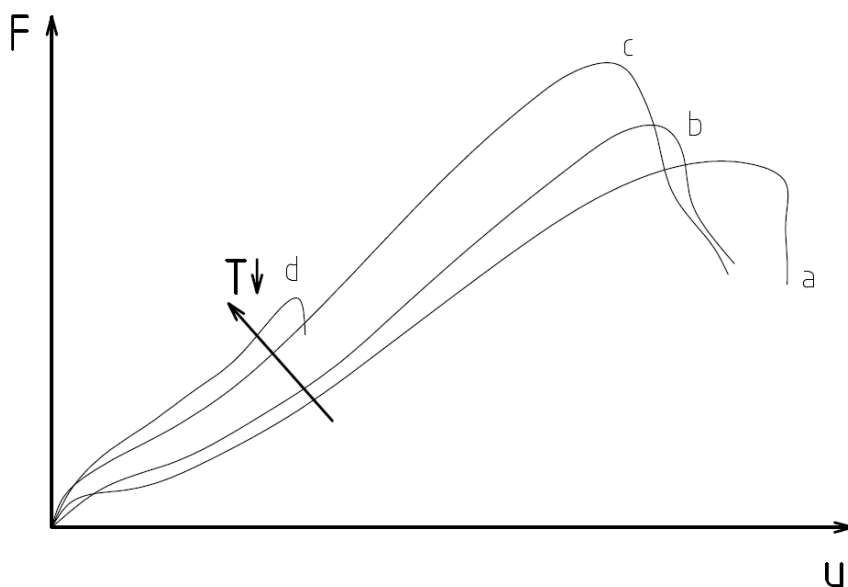
Teplotně-tranzitní přístup je jedním z často využívaných postupů při hodnocení materiálů z hlediska jejich náchylnosti ke vzniku křehkého lomu. Mezi tranzitní teploty, zavedené tímto přístupem a experimentálně určované pomocí zkoušky rázem v ohybu patří např. teplota  $t_{27J}$  (teplota odpovídající hodnotě nárazové práce  $KV = 27 J$ ), teplota  $t_{DBTT}$  (teplota přechodu křehký lom/houževnatý lom) nebo teplota  $t_{50\%}$ ,  $FATT$  (teplota odpovídající výskytu 50% tvárného typu lomu na lomové ploše). Jedná o veličiny,

souvisejícími s energetickou bilancí při porušení zkušebního tělesa, tj. s energetickou náročností lomového procesu, příp. s charakteristikami souvisejícími s mechanismem lomového procesu.

Pro odhad výše uvedených charakteristik z výsledků penetračních testů lze využít absorbované energie  $W$ . Absorbovaná energie  $W$  je tvořena plochou pod závislostí  $F - u$  do určité hodnoty přemístění síly, odpovídající síle  $F_m$  nebo  $F_f$ .

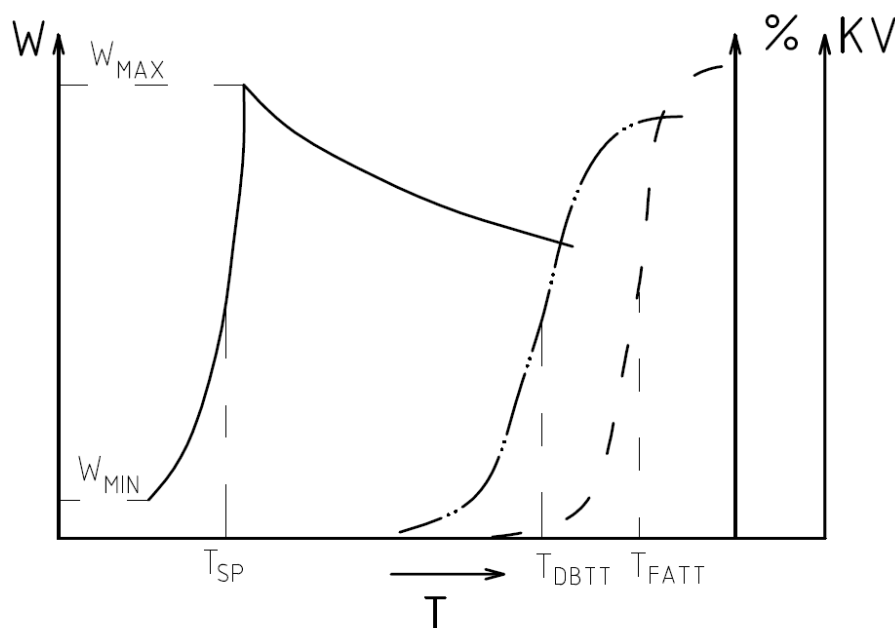
Pro určení tranzitní teploty pomocí penetračních testů je nutné mít k dispozici zatěžovací křivky naměřené za různých teplot. Příklad zatěžovacích křivek v závislosti na teplotě je uveden na obr. 21. Lze si povšimnout několika skutečností:

- při snižující se teplotě je potřeba dosáhnout větší síly  $F$  pro dosažení stejného posunutí razníku  $u$ ;
- do určité teploty se síla  $F_m$  zvyšuje a posunutí razníku odpovídající maximální síle se snižuje;
- při jisté teplotě se uplatní štěpný mechanismus porušení a je zaznamenán lom při výrazně nižších hodnotách posunutí razníku  $u$ , viz obr. 21, křivka d [22].



Obr. 21. Změna závislosti  $F - u$  při změně teploty. Teplota zkoušky  $a > b > c > d$ . Převzato a upraveno podle [22].

Ke stanovení tranzitní teploty  $T_{SP}$  určené protlačovací zkouškou je tedy nutné provést zkoušku v jistém teplotním intervalu (typicky od  $-196^{\circ}\text{C}$  do  $+25^{\circ}\text{C}$  [8]) a určit absorbovanou energii pro každou zkoušku. Energie absorbovaná tělesem do lomu s klesající teplotou vzrůstá až do dosažení jisté maximální hodnoty. Při dalším snižování teploty začne výrazně klesat. [1] Výslednou závislost absorbované energie na teplotě (v obr. 22 plná křivka) lze potom porovnávat se závislostí nárazové práce na teplotě (obr. 22, dvojčerkovaná křivka) a závislosti podílu tvárného lomu na teplotě (obr. 22, čárkovaná křivka), získané ze zkoušky rázem v ohybu, viz schéma na obr. 22.



Obr. 22 Srovnání závislosti  $W=f(T)$  s hodnotami určenými zkouškou rázem v ohybu

Po zjištění teploty  $T_{SP}$ , tj. teploty, odpovídající hodnotě absorbované energie  $[(W_{MAX} + W_{MIN})/2]$ , viz obr. 22, je možné provést korelaci na hodnotu, kterou požadujeme. V literatuře lze nalézt různé tvary přepočtových rovnic [1,22,29], např.

$$FATT[K] = \varphi \cdot T_{SP}[K], \quad (22)$$

$$FATT[K/^{\circ}\text{C}] = \varphi \cdot T_{SP}[K/^{\circ}\text{C}] + \theta, \quad (23)$$

$$DBTT[K] = \vartheta \cdot T_{SP}[K], \quad (24)$$

$$FATT[^{\circ}\text{C}] = \frac{\mu}{(T_{SP}[^{\circ}\text{C}])^2}, \quad (25)$$

kde  $\varphi$ ,  $\theta$ ,  $\vartheta$  a  $\mu$  jsou regresní parametry. Stejným způsobem jako v rov. (24) lze korelovat i hodnoty jako  $t_{27J}$  a podobné. Svým způsobem je zajímavá rov. (25), kde Bulloch použil parabolickou regresi [29]. Měření probíhalo na rotorových Cr-Mo-V ocelích a výsledná závislost má tvar

$$FATT[^\circ\text{C}] = \frac{1,92 \times 10^6}{(T_{SP}[^\circ\text{C}])^2}. \quad (26)$$

Předešlá měření jiných autorů pro stejnou ocel poskytla korelační vztah

$$FATT[^\circ\text{C}] = 3,15 \cdot T_{SP}[^\circ\text{C}] + 500. \quad (27)$$

Podle Bullocha [29] je tento vztah vyhovující v intervalu teplot 100 - 300  $^\circ\text{C}$ , při jiných teplotách je výhodnější použít rovnici s parabolickou regresí. Autor odkazuje na práci „DBTT Estimation of Ferritic Low Alloy Steels in Service Plant by means of Small Punch Test“ od Matsushity a kol. [30], kteří provedli několik analýz pro zjištění vlivu chemického složení, velikosti zrna, mikrostruktury a tvrdosti na vztah mezi  $T_{SP}$  a  $FATT$ . Z výsledků plyne, že jediným významným parametrem je velikost zrna, přičemž byla zjištěna závislost

$$FATT[\text{K}] = 1,35 \cdot T_{SP}[\text{K}] - 26,6 \cdot d[\text{mm}]^{-0,5} + 326 \quad (28)$$

kde  $d$  je střední velikost zrna. Vztah je platný pro velikost zrna 10 – 200  $\mu\text{m}$  a oceli typu Cr-Mo a Cr-Mo-V.

V práci [22] stanovili autoři korelační vztah pro ocel S460N jako

$$T_{SP}[\text{K}] = 0,56 \cdot DBTT[\text{K}]. \quad (29)$$

Ze zmíněných článků vyplývá, že tranzitní teplota určená penetračními testy je nižší, než tranzitní teplota určená zkouškou rázem v ohybu.

Vliv orientace zkušebního tělesa vzhledem ke směru tváření materiálu na hodnoty tranzitních teplot je rozebírán v práci [1]. Z experimentů plyne, že na rozdíl od zkoušky rázem v ohybu nemá orientace zkušebního tělesa při protlačovací zkoušce vliv na výsledné hodnoty. Podle [10] má být osa zkušebního tělesa pro SP test rovnoběžná se směrem šíření trhliny v Charpyho tělese.

Autoři práce [31] se zabývali hledáním vztahu mezi nárazovou prací určenou zkouškou rázem v ohybu na tělesech s V-vrubem a absorbovanou energií tělesem zjištěnou penetrační zkouškou. Experiment probíhal při kryogenních teplotách pro izotermicky vystárnuté dusíkové austenitické korozivzdorné oceli s vysokým obsahem Mn, Cr a Ni. Výsledná závislost má tvar

$$KV[\text{J}] = 89,7 W_m[\text{J}] - 63. \quad (30)$$

### 8.3.2 Přepočet hodnot zjištěných pomocí penetračního testu na lomovou houževnatost

Lomovou houževnatostí chápeme jako odpor materiálu proti nestabilnímu růstu trhliny. Tato charakteristika se zjišťuje pomocí zkušebních těles pro tříbodový, příp. čtyřbodový ohyb nebo těles namáhaných excentrickým tahem. Výsledky získané pomocí protlačovacích zkoušek na miniaturních discích se korelují s hodnotami lomové houževnatosti stanovených na základě lineárně-elastické lomové mechaniky ( $K_{IC}$ , kritická hodnota součinitele intenzity napětí) a elasticko-plastické lomové mechaniky ( $J_{IC}$ , kritická hodnota  $J$ -integrálu).

Podle [8] existují tři přístupy, jak z výsledků SPT vyhodnocovat lomovou houževnatost materiálu. Dva ze zmíněných přístupů jsou založeny na empirické korelaci, třetí na analytickém rozboru průběhu zkoušky.

#### A) Přepočet $T_{SP}$ a absorbované energie $W$ na $K_{IC}$

Tranzitní teplota  $T_{SP}$  určená protlačovací zkouškou se v literatuře přímo nepřevádí na kritickou hodnotu součinitele intenzity napětí  $K_{IC}$ . Místo toho se využije korelace nárazové práce nebo teploty  $FATT$  a lomové houževnatosti. Pro zjištění nárazové práce  $KV$  a teploty  $FATT$  se dají využít vztahy popsané v předchozí kapitole. Příkladem vybraných korelačních rovnic mohou být například rovnice [32]

#### Barsom-Rolfe

Rozsah použitelnosti:  
 $KV \in (3; 82) [J]$

$$\frac{K_{IC}^2}{E} = 0,22 \cdot (KV)^{3/2} \quad (31)$$

#### Sailors-Cortens

Rozsah použitelnosti:  
 $KV \in (7; 68) [J]$

$$K_{IC} = 14,6 \cdot (KV)^{1/2} \quad (32)$$

#### Thorby-Ferguson

Rozsah použitelnosti:  
 $KV \in (6; 55) [J]$

$$K_{IC} = 18,2 \cdot (KV)^{1/2} \quad (33)$$

#### Jones

Rozsah použitelnosti:  
oblast křehkého lomu

$$K_{IC} = \frac{6600}{60} - (T - FATT) \quad (34)$$

Ve shora uvedených rovnicích je  $E$  modul pružnosti v tahu a  $T$  teplota.

Pro zjištění lomové houževnatosti je tedy nutnost provést dvě korelace. První pro zjištění  $KV$ , popřípadě  $FATT$  z penetrační zkoušky a poté tyto hodnoty dále korelovat s  $K_{IC}$  pomocí některé z rov. (31) - (34). Tato metoda se také nazývá dvoustupňová



(z anglického Two-step method [8]). Rozdíl takto vypočtených hodnot od hodnot určených přímo, například tříbodovým ohybem, může být až 50% [8].

#### B) Přepočet efektivní deformace $\varepsilon_f$ na $J_{IC}$

Jednou z metod jak zjistit kritickou hodnotu  $J$ -integrálu pro houževnaté materiály je použití rovnici ve tvaru [8]

$$J_{IC} = k \cdot \varepsilon_f - J_0, \quad (35)$$

kde  $k$  a  $J_0$  jsou empiricky zjištěné konstanty (regresní koeficienty). Autoři práce [33] uvádí, že u nízkoalegovaných ocelí jsou hodnoty konstant materiálově nezávislé a mají hodnotu  $k = 280 \text{ N/mm}$  a  $J_0 = 50 \text{ N/mm}$ .

#### C) Přepočet lomového napětí na $K_{IC}$

Kritickou hodnotu součinitele intenzity napětí lze v případě křehkých materiálů určit pomocí SPT z rovnice [8]

$$K_{IC} = C \cdot (\sigma_f)^{\frac{2}{3}}, \quad (36)$$

kde  $C$  je empiricky zjištěná konstanta a  $\sigma_f$  lomové napětí vzorku při porušení [8].

#### D) Analytický rozbor průběhu zkoušky

Metoda navržená společností FAA (Failure Analysis Associates, Inc. [1]) pro EPRI (Electric Power Research Institute) spočívá v hodnocení lomového chování v závislosti na hustotě deformační energie potřebné pro iniciaci trhliny v tělese bez trhliny. Postup vyhodnocení lze popsat následovně:

- Záznam průběhu  $F - u$  a určení okamžiku vzniku trhliny pomocí kamery
- Stanovení závislosti  $\sigma - \varepsilon$  pro zkoušku tahem ze závislosti získané v předchozím bodě metodou popsanou v odstavci 6.
- Stanovení hustoty deformační energie odpovídající iniciaci trhliny při penetračním testu
- Stanovení lomové houževnatosti  $J_{IC}$  z odhadu síly, při které bylo dosaženo kritické hustoty deformační energie na čele trhliny u standardizovaného tělesa pro stanovení lomové houževnatosti [1,8]

#### E) Další metody

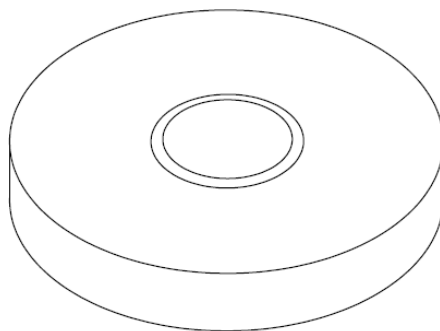
Autoři práce [34] pomocí analýzy membránového napětí a numerických simulací odvodili funkci, která určuje kritickou hodnotu  $J$ -integrálu  $J_{IC}$  oceli P355GH v závislosti pouze na dvou proměnných, a to na posunutí razníku a absorbované energii. Funkce má tvar

$$J^* = \frac{W_f - \pi r h_0 R_e (0,254 u_f + 0,170 u_f^2)^{n+1} (n+1)^{-1}}{2\pi r h_0}, \quad (37)$$

kde  $W_f$  je tělesem absorbovaná energie do lomu,  $r$  je poloměr razníku,  $h_0$  je počáteční tloušťka disku,  $u_f$  je posunutí razníku při dosažení lomové síly a  $n$  je exponent

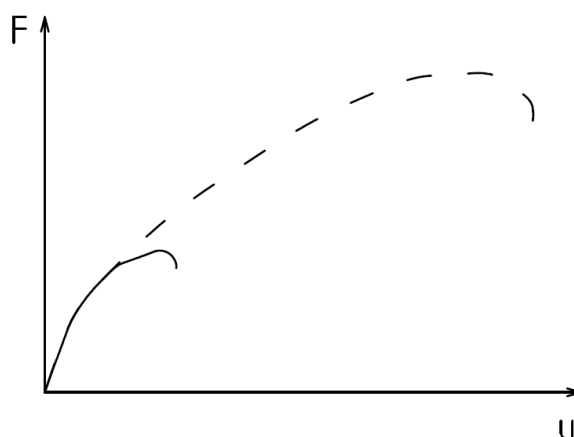
deformačního zpevnění. Zkouška byla provedena na nestandardních tělesech o průměru 10 mm a tloušťce  $0,5 \pm 0,02$  mm.

V práci [35] je navrženo nové zkušební těleso pro stanovení křehkolomových vlastností, viz obr. 23, s tloušťkou 1 mm, průměrem disku 8 mm, průměrem zářezu 2,5 mm a jeho hloubkou 0,5 mm.



Obr. 23 Těleso s vnitřním kruhovým zářezem [35]

Autoři popisují vliv vrubu na tělese z obr. 23 na průběh závislosti  $F - u$ . Rozdíl zatěžovacích křivek je uveden v grafu na obr. 24.



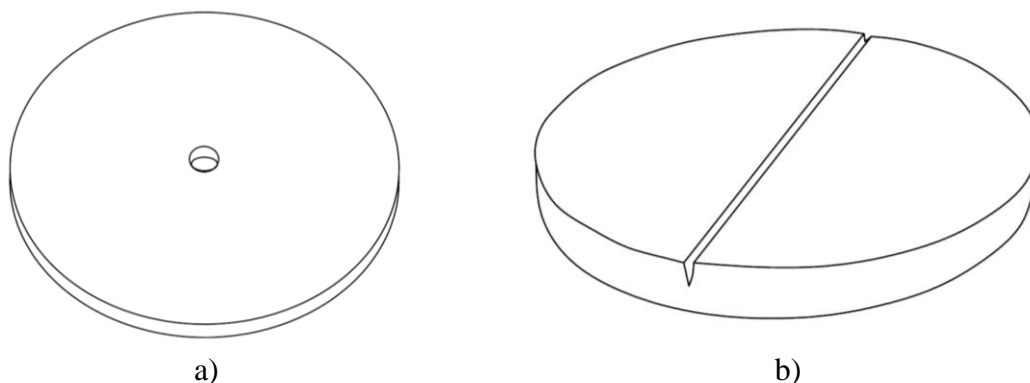
Obr. 24 Vliv vrubu na zkušební těleso. Plná čára značí těleso s vrubem, čárkovaná těleso bez vrubu [35].

V uvedené práci je také rozebírána problematika způsobu zatěžování. Z důvodu kombinace zatěžovacích módů I a II ve vrubu tělesa je zavedena efektivní hodnota součinitele intenzity napětí  $K_{\text{eff}}$  ve tvaru

$$K_{\text{eff}} = \sqrt{K_{\text{I}}^2 + K_{\text{II}}^2}. \quad (38)$$

V práci [38] se uvádí, že lomové houževnatosti zjištěné z protlačovacích zkoušek na tělesech s předpřipraveným vrubem jsou mnohem vyšší, než hodnoty zjištěné pomocí

standardních zkušebních SENB a CT těles. Za zmínku stojí upravená zkušební tělesa, která byla při testech použita. Na obr. 25a je uvedeno zkušební těleso s centrálním otvorem [36]. Jedná se o nestandardní zkušební těleso s průměrem 10 mm, průměrem otvoru  $0,8 \pm 0,02$  mm a tloušťkou 0,5 mm. Obr. 25b znázorňuje zkušební těleso o průměru 10 mm a tloušťce 1 mm. Vrub byl vytvořen pomocí laseru do hloubky 0,5 mm s přesností 4%. Rádus kořene vrubu byl, stejně jako na tělese na obr. 23, menší než  $5 \mu\text{m}$  [38].



Obr. 25 Modifikovaná zkušební tělesa

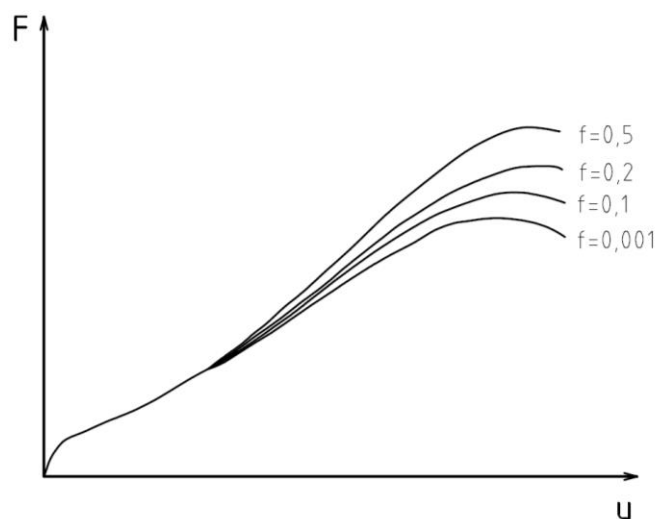
V pracích [36,37,38,39,40,41] autoři uvádí, že stav napjatosti v kořeni vrubu zkušebního tělesa pro protlačovací zkoušku je velmi podobný stavu napjatosti na CT tělesech, ale kvůli velkému rozdílu velikostí se výsledné hodnoty liší.

## 9. Vliv externích faktorů na penetrační testy

Znalost vlivu všech faktorů na průběh penetrační zkoušky a její vyhodnocení je nedílnou součástí komplexních znalostí o metodice zkoušení. V následujících kapitolách je popsán vliv nejdůležitějších faktorů na výsledky penetračních zkoušek.

### A) Vliv tření mezi vzorkem a penetrátorem na průběh závislosti $F - u$

V práci [19] autoři posuzují vliv Coulombova tření mezi matricemi a zkušebním tělesem a mezi penetrátorem a zkušebním tělesem. Analýza byla provedena pomocí numerické simulace.

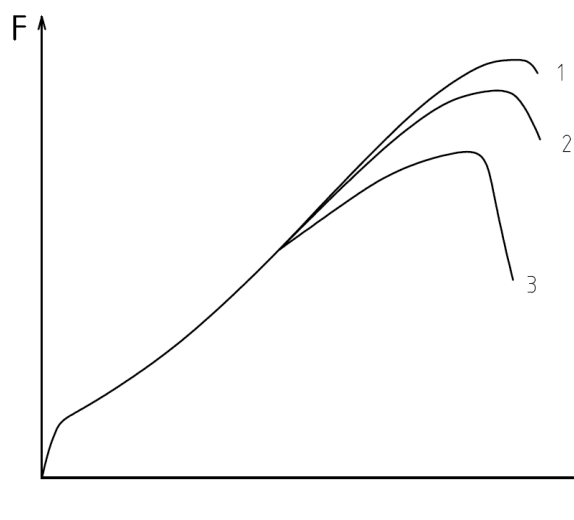


Obr. 26 Graf znázorňující vliv součinitele tření mezi penetrátorem a vzorkem na průběh závislosti  $F - u$ . Převzato a upraveno z [19].

Z článku vyplývá, že vliv statického tření, přesněji řečeno součinitele smykového tření mezi matricemi a vzorkem je nepodstatný, naproti tomu vliv tření mezi penetrátorem a vzorkem významně ovlivňuje průběh zkoušky, viz graf na obr. 26. Ke stejným závěrům došli i autoři prací [42,43].

#### B) Vliv velikosti defektu na průběh $F - u$

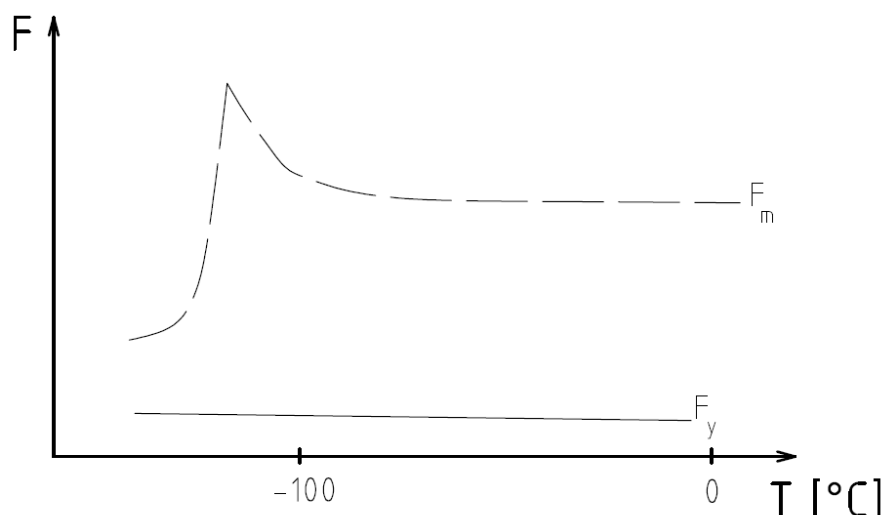
Autory práce [44] byl vyšetřován vliv přítomnosti mikrodefektů a jejich velikosti na hodnotu přechodové síly v závislosti  $F - u$ . Na základě analýzy pomocí MKP bylo prokázáno, že defekty do velikosti 100  $\mu\text{m}$  nemají vliv jak na hodnotu  $F_y$ , tak na průběh zatěžovací křivky v oblastech plastické deformace II a III. Významný vliv těchto defektů byl však prokázán v oblasti IV, kdy pod jejich vlivem docházelo k porušení při nižších hodnotách zátěžných sil v porovnání se vzorky bez defektu. V simulacích byl defekt umístěn do středu tloušťky blízko centra disku. Grafické znázornění výsledku simulací pro dvě velikosti defektu je uvedeno v grafu na obr. 27.



Obr. 27 Vliv velikosti defektu na průběh závislosti  $F - u$ . 1 – vzorek bez defektu, 2 – velikost defektu 0,05 mm, 3 – velikost defektu 0,1 mm. Převzato a upraveno podle [44].

### C) Vliv teploty na hodnotu sil $F_y$ a $F_m$

Vliv teploty na průběh závislosti zátěžné síly a deformace při penetrační zkoušce je uveden v odstavci 8.3.1. Zajímavá je závislost maximální síly na teplotě. Z grafu na obr. 28 je patrné, že při snižování teploty dochází k nárůstu maximální síly a při dalším snižování teploty k jejímu výraznému poklesu. Autoři práce [22] zdůvodňují tento náhlý pokles dosažením teploty, při které se mění mechanismus porušování materiálu. Pokud bychom teplotu zkoušky naopak zvyšovali, můžeme očekávat pokles síly  $F_y$  a  $F_m$ , podobně jako u standardní tahové zkoušky.



Obr. 28 Graf závislosti  $F_m$  a  $F_y$  na teplotě. Převzato a upraveno podle [22].

### D) Vliv poměru tloušťky vrubu k tloušťce disku a metody jeho výroby

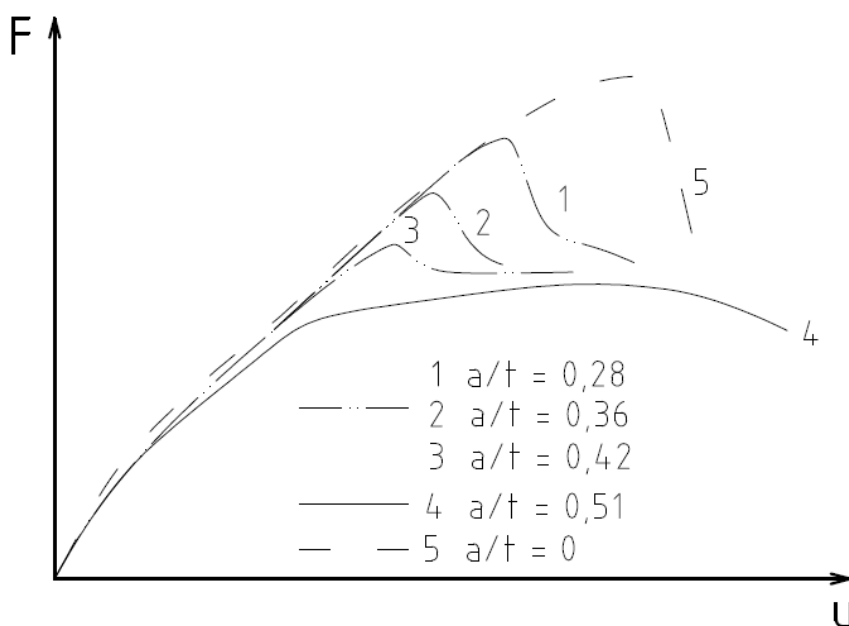
V práci [45] je vyhodnocován vliv způsobu výroby vrubu ve zkušební tělese na tvar zatěžovací křivky. Pro výrobu vrubu byly použity dvě metody:

- a) laser induced micromachining – LEM
- b) high precision micromachining – HPM.

Byl sledován vliv hloubky vrubu, respektive poměr hloubky vrubu a tloušťky vzorku  $a/t$ , kde  $a$  je hloubka vrubu a  $t$  tloušťka vzorku. Vrubu vytvořené metodou LEM jsou ostré, kdežto vruby vytvořené pomocí HPM mají radius v kořeni cca 115  $\mu\text{m}$ . Část vzorků byla připravena broušením a leštěním na metalografických strojích, část byla připravena elektrojiskrovým obráběním. Nebyl potvrzen žádný vliv těchto dvou metod na průběh zkoušky.

V grafu na obr. 29 je ukázán vliv metody výroby vrubu a poměru  $a/t$  na průběh zkoušky. Křivky označené 1, 2 a 3 značí výrobu vrubu pomocí LEM. Plná křivka označená jako 4 značí výrobu vrubu pomocí HPM a čárkovaná křivka označuje těleso bez vrubu. Autoři uvádí, že průběh zatěžování na zkušebních tělesech s vrubem vytvořeným pomocí HPM je reprodukovatelnější, protože vytvořit vrub s konstantní hloubkou pomocí LEM je značně obtížné. Naproti tomu numerická simulace potvrdila,

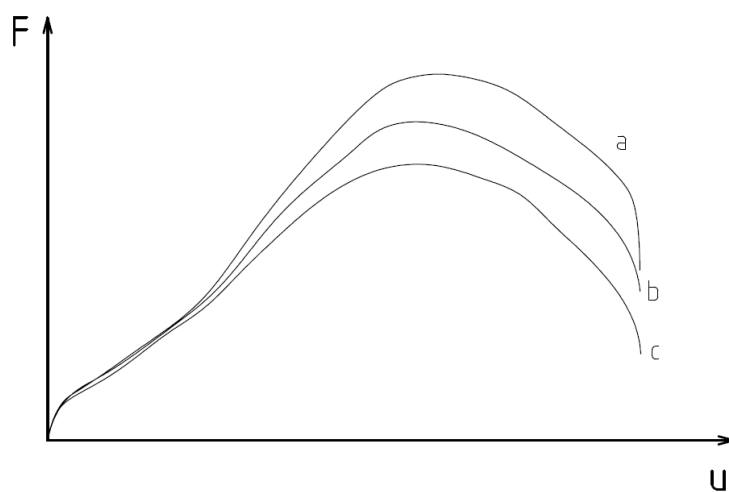
že zkušební těleso s vrubem vytvořeným pomocí LEM, tedy s ostřejším vrubem, je z hlediska koncentrace napětí na špičce trhliny více podobné CT-tělesům.



Obr. 29 Vliv metody výroby vrubu a poměru  $a/t$  na závislost  $F - u$ . Převzato a upraveno podle [45]

#### E) Vliv velikosti penetrátoru

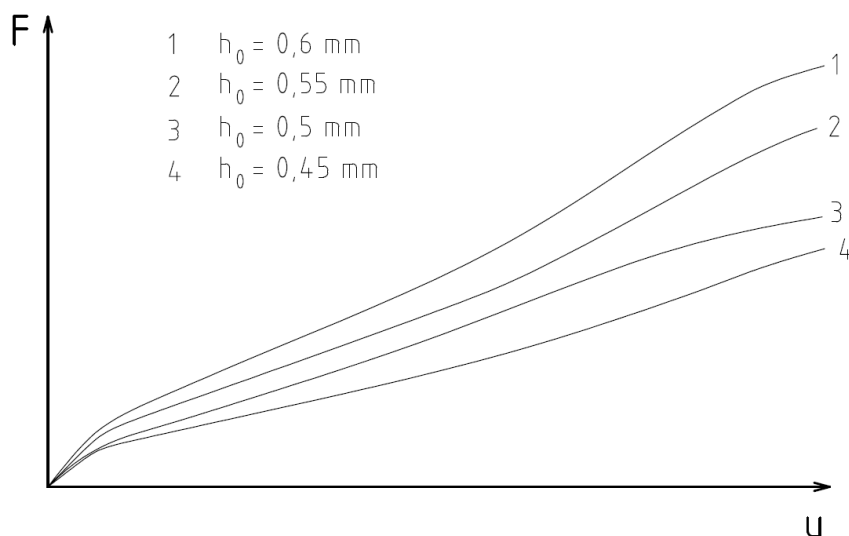
Autoři práce [42] popisují vliv velikosti penetrátoru na průběh závislosti  $F - u$ . Test byl prováděn na zkušebních tělesech pro tzv. super small punch test, tedy na discích o průměru 3 mm a tloušťce 0,25 mm. Graf na obr. 30 ukazuje tři zatěžovací křivky pro různé velikosti (průměry) penetrátorů. Křivka a) odpovídá kuličce o průměru 1,1 mm, křivka b) průměru 1 mm a křivka c) průměru 0,9 mm. Je patrné, že velikost penetrátoru má významný vliv na penetrační zkoušku v úseku III a následujících. Dochází ke zvýšení hodnot maximální síly, ale posunutí odpovídající této síle zůstává neměnné. Toto tvrzení je ve shodě i s prací [43].



Obr. 30 Vliv průměru penetrátoru na průběh závislosti  $F - u$ . Převzato a upraveno z [42]

#### F) Vliv tloušťky zkušebního tělesa

Ze závislosti  $F - u$  v grafu na obr. 31 je zřejmé, že s rostoucí tloušťkou zkušebního tělesa roste síla nutná pro dosažení stejné hodnoty průhybu. Ke stejnému závěru dospěli i autoři práce [46] pro případ SPT disků o tloušťkách cca  $60 \div 250 \mu\text{m}$ .



Obr. 31 Vliv tloušťky zkušebního tělesa. Převzato a upraveno z [43]

#### G) Další vlivy

Mezi další případné vlivy na průběh penetračních testů lze zařadit například tlak ve zkušební komoře. Autoři práce [46] byly provedeny penetrační testy za normálního tlaku a ve vysokém vakuu, přičemž nebyl zjištěn žádný vliv na průběh závislosti  $F - u$ . Posuzován byl i vliv materiálu penetrační kuličky, opět bez výskytu významné změny závislosti  $F - u$ . Jedinou změnou závislou na materiálu kuličky je podle autorů výraznější akustická odezva v okamžiku porušení zkušebního tělesa při použití keramického penetrátoru oproti ocelovému.

## 10. Závěr

Bakalářská práce rozebírá základní dělení protlačovací zkoušky na miniaturních discích, zaměřuje se hlavně na typ SPT-CDR, tedy metodu zkoušky, kde je řízenou veličinou konstantní posunutí razníku. Pozornost je věnována metodice stanovení charakteristických veličin ze záznamu penetrační zkoušky, potřebných pro další výpočty a korelace. Práce podrobně popisuje vybrané korelační vztahy pro přepočet napětíových, deformačních a křehkolomových materiálových charakteristik a popisuje některé nové způsoby jejich určování.

Protlačovací zkouška na miniaturních discích je poměrně nová progresivní metoda určování materiálových charakteristik a hodnocení vlastností materiálů. Oproti

standardním mechanickým zkouškám ovšem vyžaduje více přípravy před samotným testováním.

Z obsahu bakalářské práce je zřejmé, že doposud známé a v praxi používané korelační vztahy mezi charakteristikami plynoucími z penetračních testů a charakteristikami zjištěnými klasickými metodami zkoušení jsou silně závislé na typu testovaného materiálu, tj. že korelační vztahy platné pro jednu skupinu materiálů jsou neplatné (nevhodné) pro jinou skupinu materiálů, lišící se např. typem krystalové mřížky.

Předmětem dalšího výzkumu v oblasti penetračních testů pravděpodobně bude studium závislosti korelačních rovnic a modelů porušování při penetračních testech na externích a interních faktorech, které proces porušování výrazně ovlivňují. V současné době probíhají poměrně intenzivní práce na standardizaci metody SPT. Zkouška není dosud normována a jediný dokument, který obsahuje doporučení pro provádění penetračních testů na miniaturních discích je technická dohoda CWA 15267 z roku 2007.

Pro experimentální část práce, zahrnující penetrační testy za pokojové teploty a zkoušky tahem za stejné teploty byla použita ocel S235 JRC. Z výsledků obou typů experimentů byly určeny hodnoty veličin potřebných pro porovnání a ověření platnosti v literatuře nalezených korelačních vztahů pro výpočet napětíových charakteristik pro daný typ materiálu. Pro uvedenou ocel bylo prokázáno, že nejvhodnějším modelem (korelačním vztahem) pro výpočet hodnoty meze kluzu je rov. (13) s využitím metody zjištění síly  $F_y$  offsetem ( $h_0/100$ ), pro výpočet meze pevnosti rovnice navržená Guanem a Wangem, rov. (5). Výpočet kontrakce pomocí rov. (21) se ukázal být nezávislým na metodě zjištění sil  $F_y$  a jim odpovídajícím posunutím  $u_y$ . Určení tažnosti pomocí rov. (15) nevykazuje dobrou shodu s výsledky zkoušky tahem.

Aplikace protlačovacích zkoušek na miniaturních discích může značně snížit náklady na testování výrobků či polotovarů ve výrobě a může rovněž pomoci při vyhodnocování změn vlastností materiálů v důsledku různých degradačních procesů. V současné době se uplatňuje například při posuzování zbytkové životnosti komponent v energetickém průmyslu, speciálně jaderné energetice, kdy je používána pro hodnocení úrovně radiačního zkřehnutí, příp. jiných typů degradačních pochodů tlakových nádob jaderných reaktorů. Využití nachází metoda SPT i při kontrolách svarových spojů, kdy je díky velikosti zkušebních těles možné postihnout mechanické vlastnosti nejen vlastního svarového spoje, ale i tepelně ovlivněné zóny jako samostatné oblasti svaru.



## Seznam použitých zdrojů

- [1] MATOCHA Karel. Hodnocení mechanických vlastností konstrukčních ocelí pomocí penetračních testů. 1. vyd. Ostrava: Materiálový a metalurgický výzkum, 2010. ISBN 978-80-248-2223-5.
- [2] KANDER Ladislav, MIROSLAV FILIP, Karel MATOCHA a Jaroslav PURMENSKÝ. Hodnocení materiálových vlastností kotlového tělesa po dlouhodobém provozu metodou malých vzorků. In: Metal 2006 [online]. 2006 [cit. 2016-26-01].
- [3] GARCÍA, T. E., et al. Estimation of the mechanical properties of metallic materials by means of the small punch test. *Journal of Alloys and Compounds*, 2014, 582: 708-717.
- [4] FLEURY, Eric a Jeong HA. Small punch tests on steels for steam power plant (II). *KSME International Journal* [online]. Seoul: Korean Society of Mechanical Engineers, 9980, **12**(5), 827-835 [cit. 2016-04-03]. DOI: 10.1007/BF02945550. ISSN 1738-494X.
- [5] KAMEDA, J., MAO, X. Small-punch and TEM-disc testing techniques and their application to characterization of radiation damage. *Journal of materials science*, 1992, 27.4: 983-989.
- [6] TAKAHASHI, Hideaki, SHOJI, Tetsuo, MAO, Xinyuan. *Recommended practice for small punch (SP) testing of metallic materials (draft)*. Japan Atomic Energy Research Inst., 1988.
- [7] VOLAK, J., MENTL, V. Testing of small local zones by means of small punch test at room and creeú temperatures. *CHEMICKE LISTY*, 2010, 104: S386-S389.
- [8] CWA 15627. Small Punch Test Method for Metallic Materials: CEN Workshop Agreement. Brusel: CEN, 2007, 70 s.
- [9] Milička, Karel; Dobeš, Ferdinand. Creepová pevnost strojních součástí a svarových spojů. In *Zvariteľnosť a degradačné mechanizmy vlastností TOO zvarových spojov*. Bratislava: IBOK, a.s.; Slovenská zvaračská spoločnosť, 2008, S. 1-21.
- [10] MATOCHA, K. a J. PURMENSKÝ. Hodnocení meze únavy konstrukčních materiálů pomocí miniaturizovaných zkušebních těles. *Konstrukce*. 2006, č. 5.
- [11] MERCALDI, David W. *Surface sampling device*. U.S. Patent No 4,845,896, 1989.

- [12] MATOCHA, K., FILIP, M., PURMENSKÝ, J.: Hodnocení aktuálních křehkolomových vlastností energetických zařízení pomocí penetračních testů. *Koroze a ochrana materiálu* (3), 59-63 (2007), ISSN 0452-599X
- [13] BALÁK, Miloš, Martin BŘEZINA a Zdenka RAPANTOVÁ. Mass-production of SPT specimen. In: *Determination of Mechanical Properties of Materials by Small Punch and Other Miniature Testing Techniques: conference proceedings : the 1st International Conference SSTT : August 31 to September 2, 2010 : Ostrava, Czech Republic*. Ostrava: Ocelot, 2010, s. 87-89. ISBN 978-80-254-7994-0.
- [14] ABENDROTH, M. a S. SOLTYSIAK: Assessment of Material Properties by Means of the Small Punch Test. Recent trends in Fracture and Damage Mechanicst, s. 127-150, 2016 ISBN 978-3-319-21467-2
- [15] LORD, J. D., B. ROEBUCK, R. MORRELL a T. LUBE. 25 year perspective Aspects of strain and strength measurement in miniaturised testing for engineering metals and ceramics. *Materials Science and Technology* [online]. 2010, **26**(2), 127-148 [cit. 2016-04-03]. ISSN 0267-0836.
- [16] MAO, X., H. TAKAHASHI a T. KODAIRA. Supersmall punch test to estimate fracture toughness JIC and its application to radiation embrittlement of 2.25Cr-1Mo steel. *Materials Science and engineering: A*. 1992, roč. 150, č. 2, s. 231-236. ISSN 09215093. DOI: 10.1016/0921-5093(92)90116-I.
- [17] FONG, Randy WL; FRASER, Chris R. Evaluation of ductility of zircaloy-2 materials using a small ellipsoidal-shaped punch. In: *Small Specimen Test Techniques*. ASTM International, 1998.
- [18] ABENDROTH, Martin; KUNA, Meinhard. Identification of ductile damage and fracture parameters from the small punch test using neural networks. *Engineering fracture mechanics*, 2006, 73.6: 710-725.
- [19] HŮLKA, J.; KUBÍK, P.; PETRUŠKA, J. Sensitivity analysis of small punch test. *Engineering Mechanics*, 2012, 128.
- [20] GARCÍA, T. E., et al. Estimation of the mechanical properties of metallic materials by means of the small punch test. *Journal of Alloys and Compounds*, 2014, 582: 708-717.
- [21] LACALLE, R., ALVAREZ, J., A., CICERO, S., From Archaeology to Precious Metals: Four Applications of Small Punch Test, *Hutnické listy*, 2010, ISSN 0018-8069, ISBN 978-80-254-7994-0, pp59-68.

- [22] CONTRERAS, M. A., et al. Use of the small punch test to determine the ductile-to-brittle transition temperature of structural steels. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2008, 31.9: 727-737..
- [23] GUAN, Kaishu a Zhiwen WANG. SPT code of tensile test. In: Materiálový a metalurgický výzkum [online]. 2010
- [24] MATOCHA, Karel; FILIP, Miroslav; STEJSKALOVÁ, Šárka. Determination of critical temperature of brittleness T<sub>k0</sub> by small punch tests. 2012.
- [25] KLEVTSOV, I.; DEDOV, A.; MOLODTSOV, A. *Using of Small Punch Test for Determination of Tensile Properties for Power Plant Steels*. na, 2008. 6th International DAAAM Baltic Conference, 2008
- [26] LACALLE, R.; ÁLVAREZ, J. A.; GUTIÉRREZ-SOLANA, F. Analysis of key factors for the interpretation of small punch test results\*. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2008, 31.10: 841-849.
- [27] RODRÍGUEZ, C., et al. Mechanical properties characterization of heat-affected zone using the small punch test. *Welding journal*, 2009, 88.9: 188-192.
- [28] Karthik, V., Laha, K., Kasiviswanathan, K.V., and Baldev Raj, Determination of Mechanical Property Gradients in Heat-Affected Zones of Ferritic steel weldments by shear-punch tests. Small Specimen Test Techniques: Fourth Volume, ASTM STP 1418, M. A. Sokolov, J. D. Landes, and G. E. Lucas, Eds., ASTM International, West Conshohocken, PA, 2002.
- [29] BULLOCH, J. H. Toughness losses in low alloy steels at high temperatures: an appraisal of certain factors concerning the small punch test. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 1998, 75.11: 791-804.
- [30] MATSUSHITA, Tomiharu, et al. DBTT estimation of ferritic low alloy steels in service plant by means of small punch test. In: Key Engineering Materials. 1991. p. 259-264.
- [31] SAUCEDO-MUÑOZ, Maribel Leticia, et al. Correlation between small punch and CVN impact tests for evaluation of cryogenic fracture characteristics of isothermally-aged nitrogen-containing austenitic stainless steels. *Materials Research*, 2012, 15.2: 218-223.
- [32] SHEKHTER, A, S KIM, D.G CARR, A.B.L CROKER a S.P RINGER. Assessment of temper embrittlement in an ex-service 1Cr–1Mo–0.25V power generating rotor by Charpy V-Notch testing, K<sub>Ic</sub> fracture toughness and small punch test. *International Journal of Pressure Vessels and Piping* [online].

2002, **79**(8), 611-615 [cit. 2016-03-27]. DOI: 10.1016/S0308-0161(02)00087-X. ISSN 0308-0161.

- [33] Mentl, V., Volák, J., Comparison of fracture toughness values determined by standardized method and small punch test. *Engineering Mechanics*, 2013, 159.
- [34] YANG, Sisheng, Zheng YANG a Xiang LING. Fracture toughness estimation of ductile materials using a modified energy method of the small punch test. *Journal of Materials Research* [online]. Warrendale: Cambridge University Press, 2014, **29**(15), 1675-1680 [cit. 2016-03-28]. DOI: 10.1557/jmr.2014.205. ISSN 08842914.
- [35] TURBA, K., B. GÜLÇİMEN, Y.Z. LI, D. BLAGOEVA, P. HÄHNER a R.C. HURST. Introduction of a new notched specimen geometry to determine fracture properties by small punch testing. *Engineering Fracture Mechanics*[online]. 2011, **78**(16), 2826-2833 [cit. 2016-03-28]. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2011.08.014. ISSN 0013-7944.
- [36] XU, Yifei, Tong XU, Kaishu GUAN a Yanyan LU. Prediction of cleavage fracture in ferritic steels by small punch tests with a modified Weibull stress model. *Engineering Fracture Mechanics* [online]. 2014, **124-125**, 97-111 [cit. 2016-03-28]. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2014.04.005. ISSN 0013-7944.
- [37] RASCHE, Stefan a Meinhard KUNA. Improved small punch testing and parameter identification of ductile to brittle materials. *International Journal of Pressure Vessels and Piping* [online]. Elsevier Ltd, 0150n. 1., **125**, 23-34 [cit. 2016-03-28]. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2014.09.001. ISSN 0308-0161
- [38] XU, Yifei a Kaishu GUAN. Evaluation of fracture toughness by notched small punch tests with Weibull stress method. *Materials and Design* [online]. 2013, **51**, 605-611 [cit. 2016-03-28]. DOI: 10.1016/j.matdes.2013.04.071. ISSN 0261-3069.
- [39] LINSE, T., M. KUNA a H.-W. VIEHRIG. Quantification of brittle-ductile failure behavior of ferritic reactor pressure vessel steels using the Small-Punch-Test and micromechanical damage models. *Materials Science & Engineering A*[online]. 2014, **614**, 136-147 [cit. 2016-03-28]. DOI: 10.1016/j.msea.2014.05.095. ISSN 0921-5093.
- [40] RASCHE, Stefan, Stefan STROBL, Meinhard KUNA, Raul BERMEJO a Tanja LUBE. Determination of Strength and Fracture Toughness of Small Ceramic Discs Using the Small Punch Test and the Ball-on-three-balls Test. *Procedia Materials Science* [online]. 2014, **3**, 961-966 [cit. 2016-03-28]. DOI: 10.1016/j.mspro.2014.06.156. ISSN 2211-8128.

- [41] LINSE, T., M. KUNA, J. SCHUHKNECHT a H.-W. VIEHRIG. Usage of the small-punch-test for the characterisation of reactor vessel steels in the brittle–ductile transition region. *Engineering Fracture Mechanics* [online].2008, **75**(11), 3520-3533 [cit. 2016-03-28]. DOI: 0.1016/j.engfracmech.2007.03.047. ISSN 0013-7944.
- [42] PATHAKA, K. K., et al. Influence of key test parameters on SPT results.*Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, 2009, 16: 385-389.
- [43] XU, Zhenzhen. *An Inverse Finite Element Analysis and A Parametric Study of Small Punch Tests*. 2011. PhD Thesis. Texas A&M University.
- [44] GUAN, Kai-shu, Tong XU, Xiao-cheng ZHANG a Zhi-wen WANG. Effect of microdefects on load-deflection of small punch test by experimental investigation and finite element analysis. *International Journal of Pressure Vessels and Piping* [online]. 2013, **110**, 14-16 [cit. 2016-03-30]. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2013.04.016. ISSN 0308-0161.
- [45] CUESTA, I.I., C. RODRIQUEZ, F.J. BELZUNCE a J.M. ALEGRE. Analysis of different techniques for obtaining pre-cracked/notched small punch test specimens. *Engineering Failure Analysis* [online]. 2011, **18**(8), 2282-2287 [cit. 2016-03-30]. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2011.08.004. ISSN 1350-6307.
- [46] FINARELLI, D., F. CARSUGHI a P. JUNG. The small ball punch test at FZJ. *Journal of Nuclear Materials* [online]. 2008, **377**(1), 65-71 [cit. 2016-03-30]. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2008.02.053. ISSN 0022-3115.

## **Seznam použitých zkratek**

CDR	Constant Displacement Rate
CEN	Comité Européen de Normalisation
CESI	Centro Elettrotecnico Sperimentale Italiano Giacinto Motta
CF	Constant Force
CT	Compact Tension
EPRI	Electric Power Research Institute
FAA	Failure Analysis Associates, Inc.
HPM	High Precision Micromachining
JAERI	Japan Atomic Energy Research Institute
LEM	Laser Induced Micromachining
MKP	Metoda Konečných Prvků
R	Relaxation
SENB	Single Edge Notched Bend
SPT	Small Punch Test
ÚMVI	Ústav Materiálových Věd a Inženýrství

## Seznam obrázků

- Obr. 1 Odběr zkušebního materiálu pomocí mechanického odbrušování [11]
- Obr. 2 Příklad odebraného vzorku pomocí mechanického odbroušení a následné vyříznutí čtyř zkušebních těles [12]
- Obr. 3 Příklad označení zkušebního tělesa metodou vybrušování
- Obr. 4 Schéma uspořádání zkoušky
- Obr. 5 Tvar křivek v závislosti na neměnné veličině
- Obr. 6 Způsob uložení zkušebního tělesa při Punch drawing testu a Bulge punch testu
- Obr. 7 Schéma ball punch testu s penetrátorem kuličkou a penetrátorem ve tvaru tyče s hemisférickým zakončením
- Obr. 8 Uspořádání stříhového penetračního testu
- Obr. 9 Uspořádání ohybového penetračního testu
- Obr. 10 Schématický náčrt kruhových zkušebních těles
- Obr. 11 Schématický náčrt čtvercového zkušebního tělesa
- Obr. 12 Typický graf závislosti síla  $F$  – průhyb  $u$  při zkoušce CDR u tažného materiálu
- Obr. 13 Schematické znázornění charakteristického průběhu trhliny
- Obr. 14 Porušení zkušebního tělesa: Standardní a nestandardní [19]
- Obr. 15 Princip metody offsetu
- Obr. 16 Princip metody dvou tangent
- Obr. 17 Princip metody inflexního bodu
- Obr. 18 Stanovení průhybu  $u_y, u_m$  a  $u_f$
- Obr. 19 Znázornění absorbované energie do lomu a do maximální síly
- Obr. 20 Místo měření finální tloušťky vzorku
- Obr. 21 Změna závislosti  $F - u$  při změně teploty. Převzato a upraveno podle [22]
- Obr. 22 Srovnání závislosti  $W=f(T)$  s hodnotami určenými zkouškou rázem v ohybu
- Obr. 23 Těleso s vnitřním kruhovým zářezem [41]

- Obr. 24 Vliv vrubu na zkušební těleso [35]
- Obr. 25 Modifikovaná zkušební tělesa
- Obr. 26 Graf znázorňující vliv součinitele tření na průběh závislost  $F - u$ .  
Převzato a upraveno podle [19]
- Obr. 27 Vliv velikosti defektu na průběh  $F - u$ . Převzato a upraveno podle [44]
- Obr. 28 Graf závislosti  $F_m$  a  $F_y$  na teplotě. Převzato a upraveno podle [22]
- Obr. 29 Vliv metody výroby vrubu a poměru  $a/t$  na závislost  $F - u$ . Převzato a upraveno podle [45]
- Obr. 30 Vliv průměru penetrátoru na průběh závislosti  $F - u$ . Převzato a upraveno podle [42]
- Obr. 31 Vliv tloušťky zkušebního tělesa. Převzato a upraveno podle [43]



## Seznam tabulek

Tabulka 1	Počet zkušebních těles v závislosti na typu zkoušky [8]
Tabulka 2	Hodnoty sil $F_m$ oceli S235 JRC
Tabulka 3	Srovnání vypočtených mezí pevnosti
Tabulka 4	Síly $F_y$ oceli S235 JRC zjištěné různými metodami
Tabulka 5	Korelace sil $F_y$ na mez kluzu pomocí rov. (10)
Tabulka 6	Korelace sil $F_y$ na mez kluzu pomocí rov. (11)
Tabulka 7	Korelace sil $F_y$ na mez kluzu pomocí rov. (12)
Tabulka 8	Korelace sil $F_y$ na mez kluzu pomocí rov. (13)
Tabulka 9	Posunutí razníku $u_m$ odpovídající síle $F_m$
Tabulka 10	Korelace tažnosti $A_{SPT}$ a $u_m$ pomocí rov. (15)
Tabulka 11	Posunutí razníku odpovídající síle $F_f$ a silám $F_y$
Tabulka 12	Korelace kontrakcí $Z_{SPT}$ a $Z$ pomocí rov. (21)

## Seznam použitých symbolů

<i>Veličina</i>	<i>Jednotka</i>	<i>Popis</i>
$A$	%	Tažnost
$A_{\text{SPT}}$	%	Tažnost určená přepočtem z SPT
$C$	-	Regresní parametr
$d$	mm	Střední velikost zrna
$DBTT$	K	Teplota odpovídající střední hodnotě maximální a minimální energetické náročnosti lomu
$E$	MPa	Youngův modul
$E^{\text{SP}}$	J	Lomové energie
$F_{\text{ATT}}$	K	Teplota odpovídající 50% křehkého lomu na lomové ploše
$F_y$	N	Síla charakterizující přechod z elastické do plastické oblasti
$F_{y\_CEN}$	N	Síla $F_y$ zjištěná metodou CEN
$F_{y\_Mao}$	N	Síla $F_y$ zjištěná metodou Mao
$F_{y\_h0/10}$	N	Síla $F_y$ zjištěná metodou offsetu $h_0/10$
$F_{y\_h0/100}$	N	Síla $F_y$ zjištěná metodou offsetu $h_0/100$
$F_{y\_inf}$	N	Síla $F_y$ zjištěná metodou inflexního bodu
$F_m$	N	Maximální dosažená síla
$F_f$	N	Lomová síla, smluvně definována jako 0,8 $F_m$
$h_0$	mm	Počáteční tloušťka zkušebního tělesa
$h_f$	mm	Finální tloušťka zkušebního tělesa
$J_{\text{IC}}$	$\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$	Kritická hodnota J-integrálu
$J_0$	-	Regresní parametr
$k$	-	Regresní parametr
$KV$	J	Nárazová práce na tělese s V vrubem
$K_{\text{IC}}$	$\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$	Kritická hodnota součinitele intenzity napětí
$K_{\text{eff}}$	$\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$	Efektivní hodnota součinitele intenzity napětí
$n$	-	Koeficient zpevnění
$n_\tau$	-	Exponent deformačního zpevnění zjištěný SPT
$r$	mm	Poloměr razníku
$R_e$	MPa	Mez kluzu určená zkouškou tahem
$R_m$	MPa	Mez pevnosti určená zkouškou tahem
$T_{\text{SP}}$	K	Tranzitní teplota stanovená pomocí penetrační zkoušky
$t_{27J}$	K	Teplota odpovídající nárazové práci 27J
$u_f$	mm	Průhyb odpovídající lomové síle
$u_m$	mm	Průhyb při dosažení maximální síly
$u_y$	mm	Průhyb odpovídající síle přechodu z elastické do plastické oblasti
$W_f$	J	Absorbovaná energie do lomu tělesa
$W_m$	J	Absorbovaná energie v okamžiku dosažení maximální síly
$Z$	%	Kontrakce
$Z_{\text{SPT}}$	%	Kontrakce určená přepočtem z SPT
$\alpha_i$	-	Regresní parametry
$\beta_i$	-	Regresní parametry
$\gamma$	-	Regresní parametr
$\delta_i$	-	Regresní parametry
$\varepsilon$	-	Poměrná deformace

$\bar{\varepsilon}$	-	Skutečná deformace
$\varepsilon_f$	-	Efektivní lomová deformace
$\theta$	-	Regresní parametr
$\mu$	-	Regresní parametr
$\vartheta$	-	Regresní parametr
$\sigma$	MPa	Smluvní napětí
$\sigma_f$	MPa	Lomové napětí ve vzorku při porušení
$\tau_m$	MPa	Střihové napětí při maximálním zatížení
$\tau_y$	MPa	Střihové napětí na přechodu elastické a plastické zón
$\varphi$	-	Regresní parametr



## Test report

Test standard : CSN EN ISO 6892-1

Material : S235 JRC - SA

Specimen type : 5x25 mm, DIN 50125

Pre-load : 4 MPa

Speed in the yield range : 1 mm/min

Speed, E-Modulus : 1 mm/min

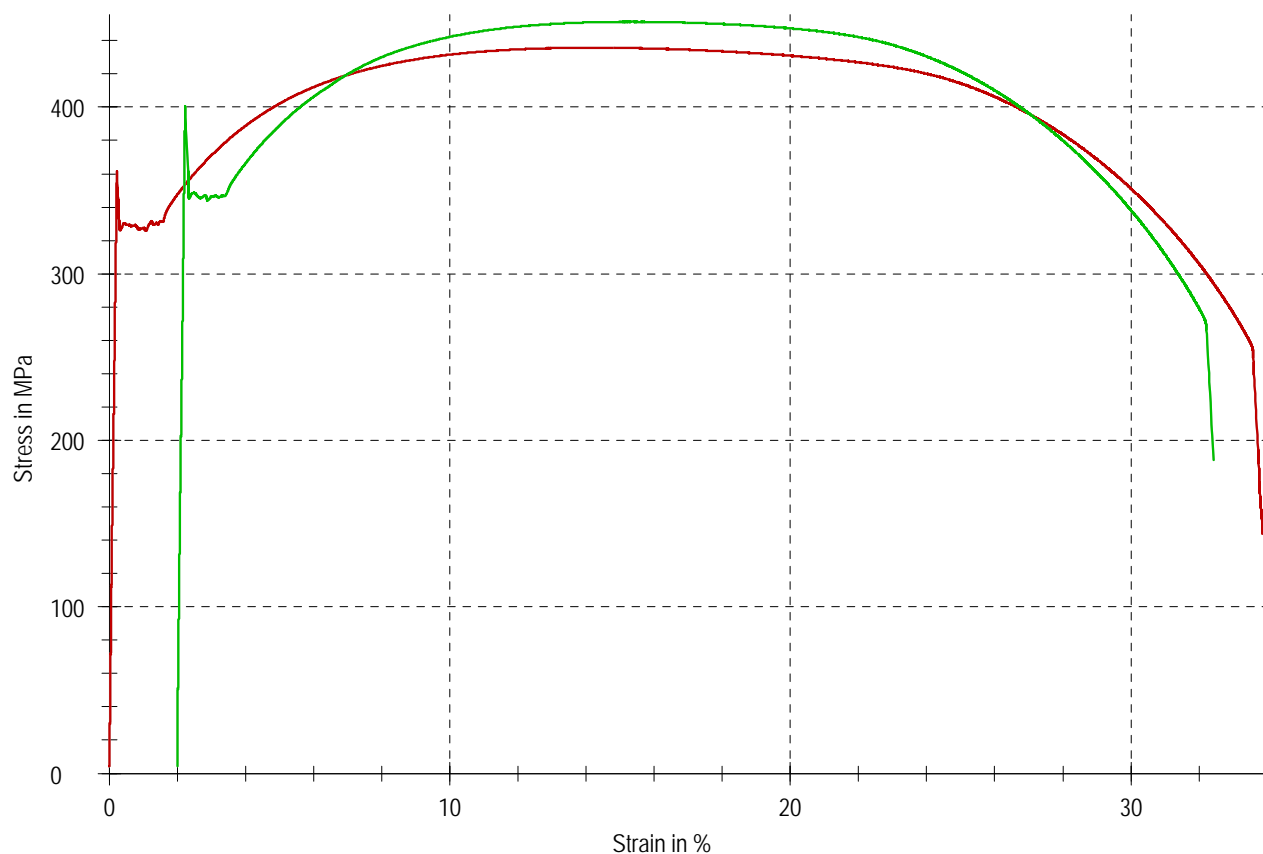
Test speed : 2 mm/min

Speed, yield point : 1 mm/min

## Test results:

Legend	Specimen ID	Notes	d <sub>0</sub> mm	m <sub>E</sub> GPa	R <sub>eL</sub> MPa	R <sub>eH</sub> MPa	R <sub>m</sub> MPa	R <sub>B</sub> MPa	A <sub>g</sub> %	A <sub>gt</sub> %	A <sub>t</sub> %	A %	Z %
<span style="color: red;">■</span>	1	25 °C	4,99	195	326	362	436	144	14,3	14,5	33,9	33,8	68,9
<span style="color: green;">■</span>	2	25 °C	4,99	201	344	400	451	188	13,2	13,4	30,4	30,3	69,5

## Series graph:





## Test report

Material : S235 JRC - SA

Specimen type : 8 x 0.5

Pre-load : 5 N

Speed crush yield point : 1 mm/min

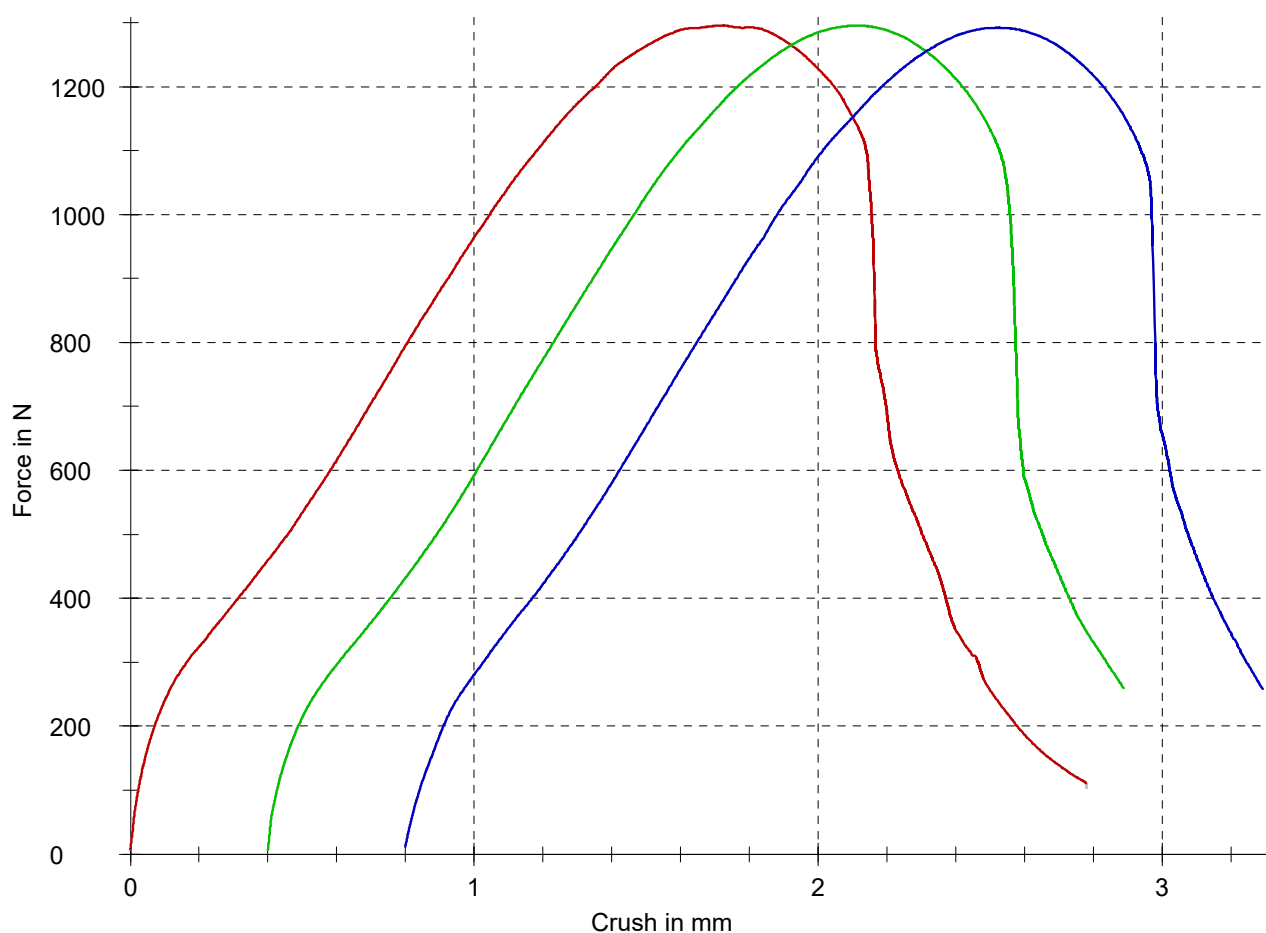
Speed, compression modulus : 1 mm/min

Test speed : 1 mm/min

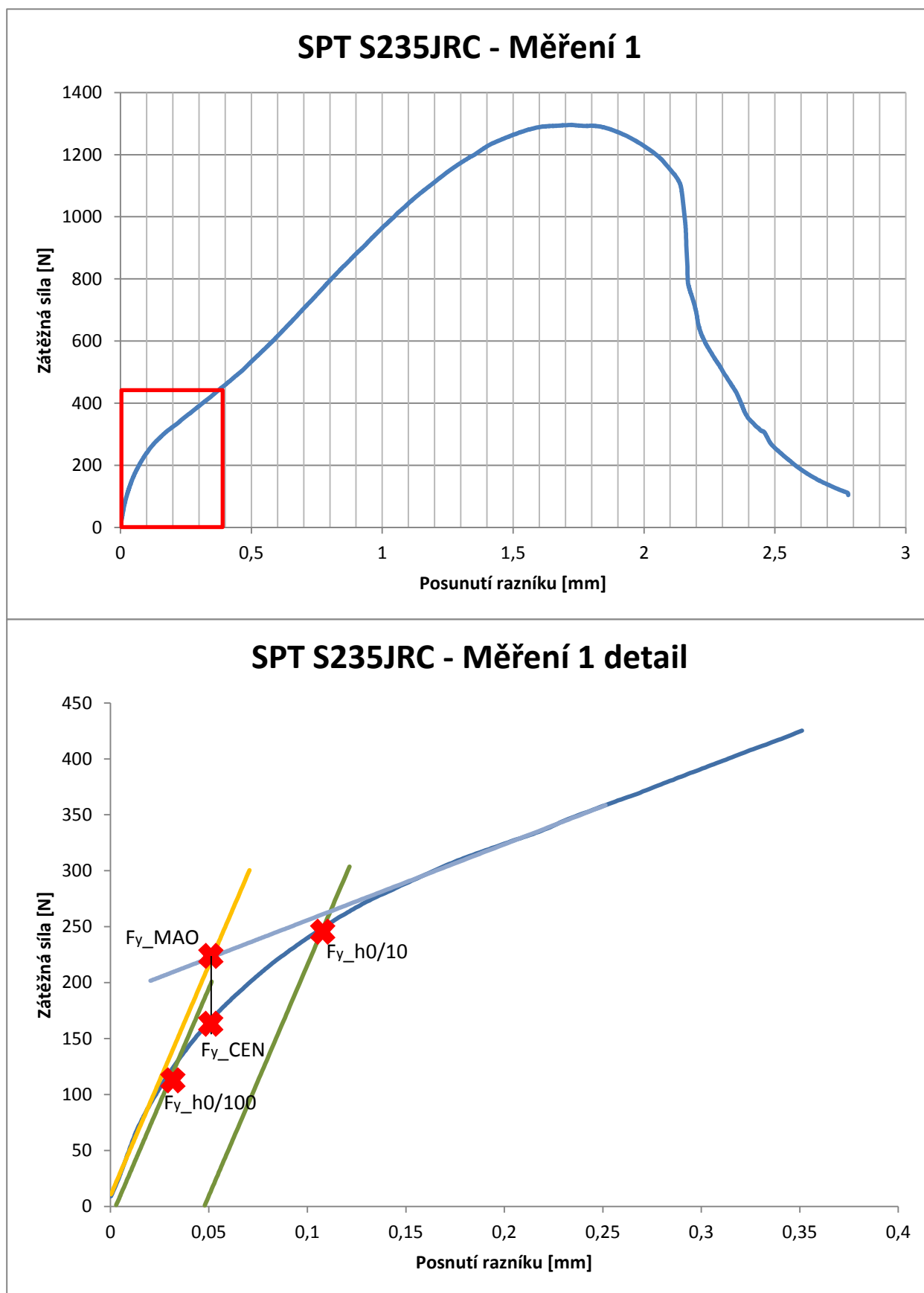
### Test results:

Legend	Specimen ID	Notes	$h_0$ mm	$S_0$ mm <sup>2</sup>	$R_m$ MPa	$\sigma_{dM}$ MPa	$\varepsilon_{dM}$ %
<span style="color: red;">■</span>	1	25 °C	0,499	50,27	26	26	6,9
<span style="color: green;">■</span>	2	25 °C	0,498	50,27	26	26	6,3
<span style="color: blue;">■</span>	3	25 °C	0,497	50,27	26	26	5,4

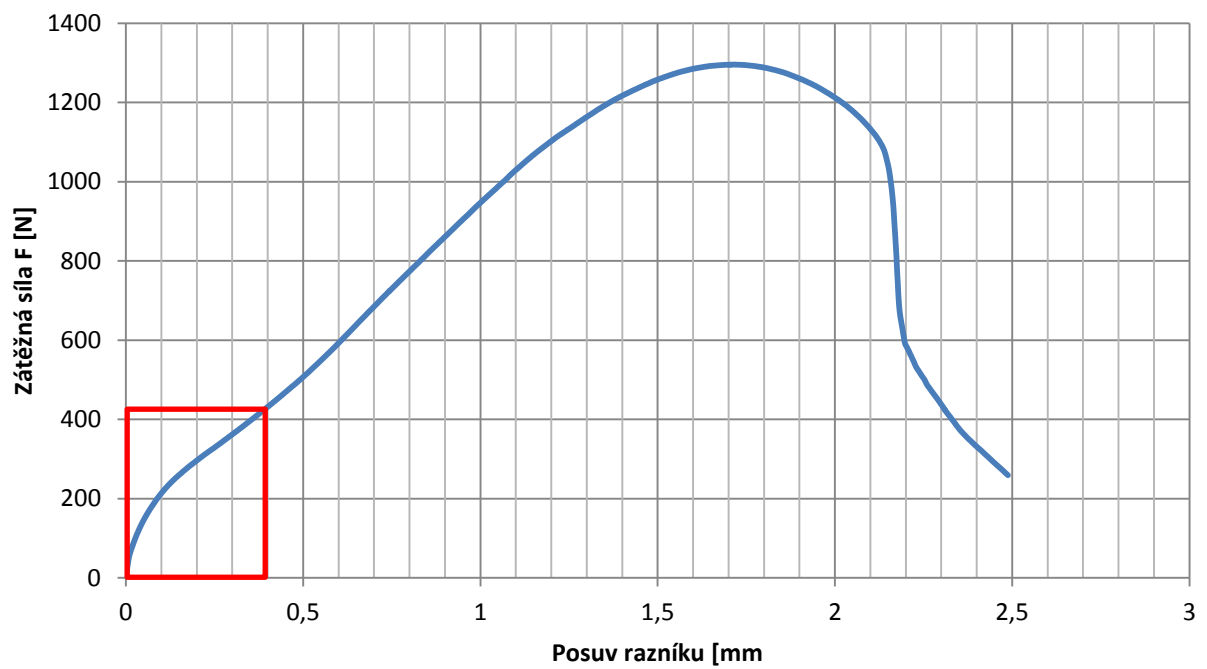
### Series graph:



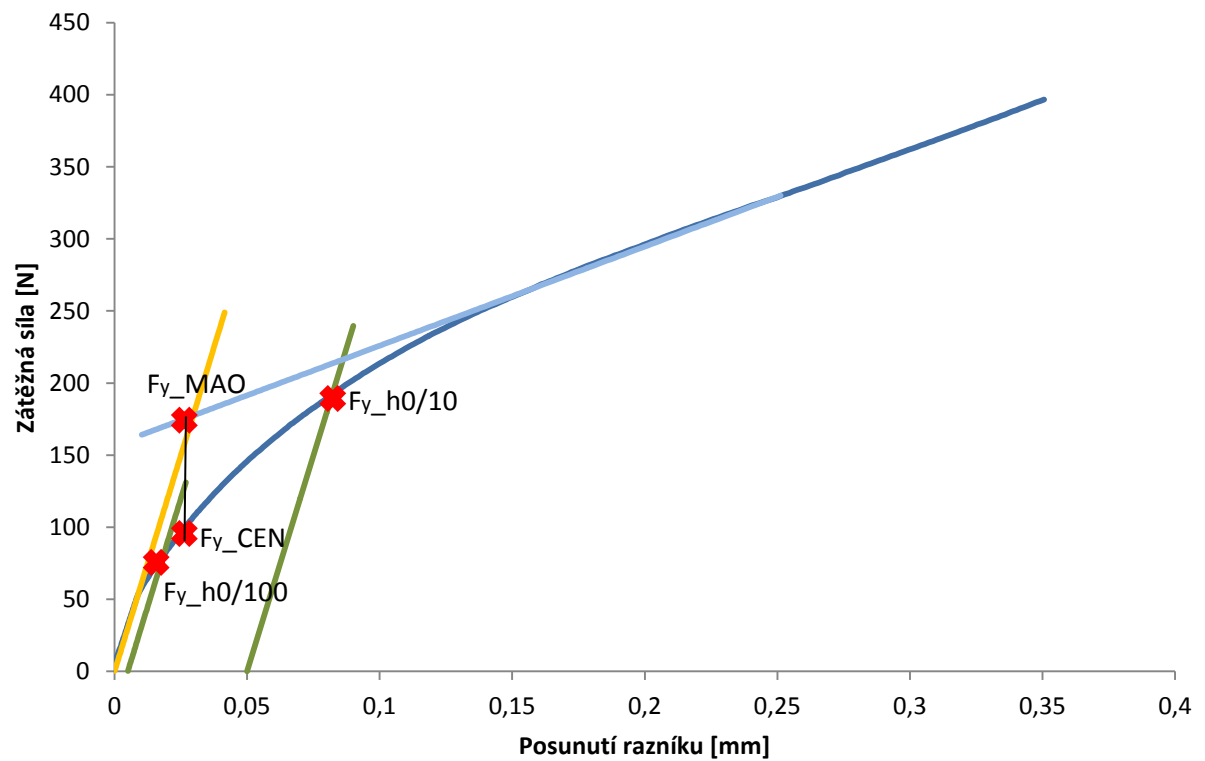
### Příloha 3



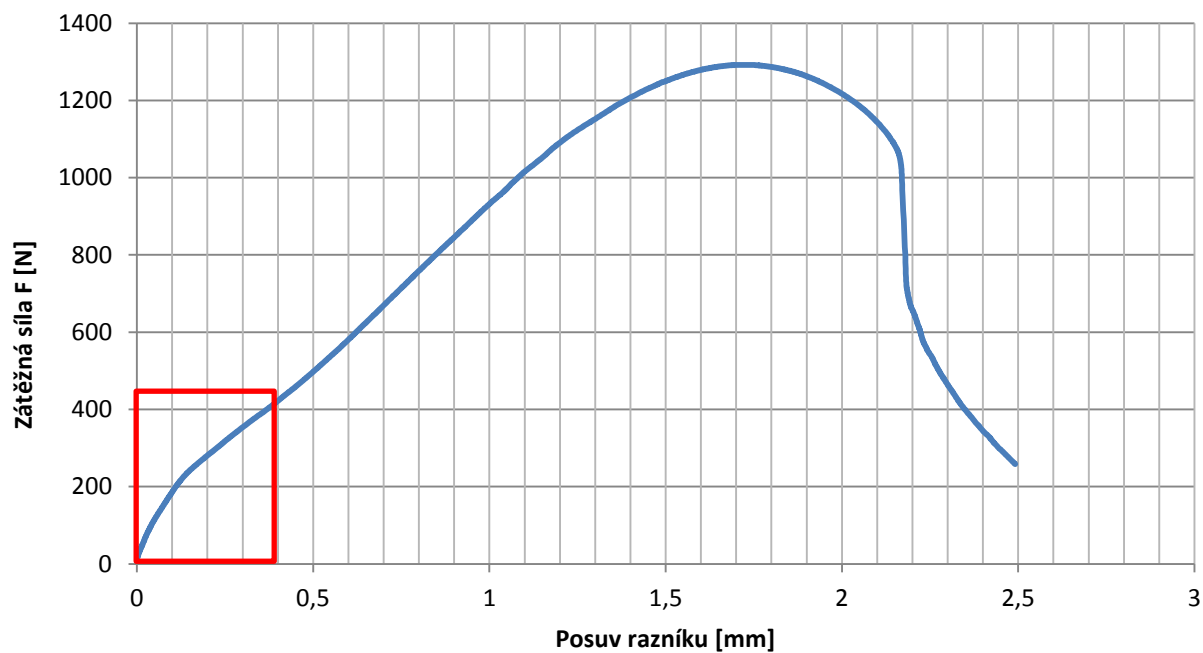
## SPT S235JRC - měření 2



## SPT S235JRC - Měření 2 detail



### SPT S235JRC - měření 3



### SPT S235JRC - Měření 3 detail

